



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR -RF 141501

PEMODELAN INVERSI 2-D DATA MAGNETOTELURIK PADA LAPANGAN PANAS BUMI “BASRI” SULAWESI BARAT

ALIF AL BASHRI

NRP 3714100010

Dosen Pembimbing

Dr. Ayi Syaeful Bahri, M.T

NIP. 19690906 199702 1 001

Anik Hilyah, S.Si, M.T

NIP. 19790813 200812 2 002

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA

Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, Dan Kebumian

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RF141501

PEMODELAN INVERSI 2-D DATA MAGNETOTELURIK PADA LAPANGAN PANAS BUMI “BASRI” SULAWESI BARAT

ALIF AL BASHRI

NRP. 3714100010

Dosen Pembimbing

Dr. Ayi Syaeful Bahri, M.T

NIP. 19690906 199702 1 001

Anik Hilyah, S.Si, M.T

NIP. 19790813 200812 2 002

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA

Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan Dan Kebumian

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

UNDERGRADUATE THESIS - RF141501

**INVERSION OF TWO DIMENSIONAL MAGNETOTELURIC DATA
IN GEOTHERMAL AREA “BASRI” WESTERN SULAWESI**

Alif Al Bashri

NRP. 3714100010

Supervisor

Dr. Ayi Syaeful Bahri, M.T

NIP. 19690906 199702 1 001

Anik Hilyah, S.Si, M.T

NIP. 19790813 200812 2 002

DEPARTMENT OF GEOPHYSICS ENGINEERING

Faculty Of Civil, Enviromental, And Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “**Pemodelan Inversi 2-D Data Magnetotelurik Pada Lapangan Panas Bumi “Basri” Sulawesi Barat**” merupakan hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip telah ditulis lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 2 Juli 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN INVERSI 2-D DATA MAGNETOTELURIK PADA LAPANGAN PANAS BUMI "BASRI" SULAWESI BARAT

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Surabaya, 2 Juli 2018

Menyetujui,

-
1. Dr Ayi Syaeful Bahri, M.T (Pembimbing I)
NIP. 19690906 199702 1 001
-
2. Anik Hilyah, S.Si, M.T. (Pembimbing II)
NIP. 19790813 200812 2 002
-
3. Wien Lestari, S.T, M.T. (Penguji I)
NIP. 19810002 201212 2 003
-
4. Juan Pandu GNR, S.Si, M.T. (Penguji II)
NIP. 19890612 201504 1 003

Mengetahui,

Kepala Laboratorium Geofisika Eksplorasi
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Dr. Ayi Syaeful Bahri, M.T
NIP. 19690906 199702 1 001

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRAK

PEMODELAN INVERSI 2-D DATA MAGNETOTELURIK PADA LAPANGAN PANAS BUMI “BASRI” SULAWESI BARAT.

Nama : Alif Al Bashri
NRP : 03411440000010
Dosen Pembimbing : Dr. Ayi Syaeful Bahri, M.T
Anik Hilyah, S.Si, M.T

Lapangan panas bumi “Basri” secara geologi terbentuk akibat aktifitas sesar geser yang menciptakan gawir sesar yang berbentuk setengah radial dan menimbulkan zona depresi. *Heat source* diperkirakan dari sisa panas dapur magma yang berasosiasi dengan aktivitas plutonik muda berumur kuartar. Metode magnetotelurik mengukur di daerah lapangan panas bumi dengan sebaran titik ukur berjumlah 19 titik dengan total lintasan pengukuran sebanyak enam lintasan. Lintasan satu sampai dengan tiga mempunyai arah lintasan barat laut – tenggara dan lintasan empat sampai dengan enam mempunyai arah lintasan barat daya – timur laut. Tahapan pengolahan meliputi konversi data domain waktu menjadi domain frekuensi, seleksi *crosspower*, proses *smoothing data*, koreksi efek static, parameterisasi inversi 2-D, dan interpretasi model inversi. Pemodelan data magnetotelurik menggunakan metode inversi *Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)* menghasilkan model inversi magnetotelurik 2-D. Nilai RMS pada masing – masing model inversi secara keseluruhan dibawah 2,5 %. Hasil akhir model inversi diinterpretasikan menggunakan parameter berupa nilai resistivitas dan informasi geologi. Nilai resistivitas dengan rentang nilai 20 – 50 ohm meter diperkirakan sebagai lapisan *cap rock*, nilai 100-250 ohm meter diduga sebagai lapisan reservoir panas bumi, diatas 250 ohm meter diprediksi sebagai lapisan *heat source*. Lapisan *cap rock* menebal kearah barat laut dan timur laut dengan ketebalan bervariasi dari 100 – 1500 meter, lapisan reservoir mempunyai ketebalan konstan sebesar 500 meter dan lapisan *heat source* menebal kearah tenggara dan timur laut dengan ketebalan lebih dari 2000 meter.

Kata kunci : *inversi NLCG, magnetotelurik, model inversi 2-D*

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

INVERSION OF TWO DIMENSIONAL MAGNETOTELLURIC DATA IN GEOTHERMAL AREA “BASRI” WESTERN SULAWESI.

Name : Alif Al Bashri
NRP : 0341144000010
Supervisor : Dr. Ayi Syaeful Bahri, M.T
Anik Hilyah, S.Si, M.T

The geothermal system in *Basri* area is formed by shear fault activities that created a half-size radial fault scarps and creates a depression zone. Heat source is estimates from the remaining of magma chamber's heat and it associations with *quarter plutonic* activities. Magnetotelluric method measures 19 point MT in the geothermal system field with 6 line measurement. Line 1 until 3 has a northwest – southeast direction and line 4 until 6 has a southwest – northeast direction. The processing step of magnetotelluric are consist of time domain conversion to frequency domain, *crosspower* selection, smoothing data, static effect correction, parameterization of 2-D Inversion, and interpretation of inversion model. Modeling of magnetotelluric data using Non Linear Conjugate Gradient inversion method and it creates a two dimensional inversion of magnetotelluric. All of value RMS in inversion's models are below 2,5 % . The interpretation of inversion's model is using resistivity value and geological information. A resistivity value with a range 20 until 50 ohm meter is estimated as cap rock zone, 100 until 250 ohm meter suspected as reservoir zone, and above 250 ohm meter predicted as heat source zone. Cap rock zone thickening towards the northwest and northeast with 100 – 1500 meters, reservoir zone has a constant thickness of 500 meters, and heat source thickening towards the south easth and north easth more than 2000 meters

Keyword : *inversion NLCG, magnetotelluric, modeling 2D inversion*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Ada pepatah mengatakan hasil tidak akan mengkhianati kerja keras yang dilakukan sepenuh hati dan begitu juga sebaliknya, seperti yang telah penulis lakukan pada penulisan karya yang berjudul “Pemodelan Inversi 2-D Data Magnetotelurik Pada Lapangan Panas Bumi “Basri” Sulawesi Barat”. Rasa syukur selalu dihaturkan kepada Sang Pencipta, karena berkat izin dari-Nya penulisan karya tersebut selesai tepat waktu. Selain itu penulis memberi apresiasi berupa rasa terima kasih kepada pihak-pihak yang berkontribusi dalam proses penulisannya diantaranya sebagai berikut.

1. Bapak ,ibu dan paktde Iwan .
2. Pak Ayi dan bu Anik sebagai dosen pembimbing pada penulisan skripsi.
3. Pak Wiwid sebagai pembimbing di kantor PSDMBP, Badan Geologi.
4. Bu Wien dan Pak Juan sebagai dosen penguji pada sidang akhir.
5. Serta teman-teman teknik geofisika ITS angkatan 2014.

Selain itu dalam proses penulisan karya ini, penulis banyak menerima bantuan berupa saran dan kritik dari rekan rekan mahasiswa teknik geofisika ITS serta dosen wali secara langsung hingga pada akhirnya penulisan karya ini selesai secara tuntas. Adapun pada karya ini secara garis besar berisi tentang penelitian sistem panas bumi dengan metode magnetotelurik sebagai media untuk identifikasi struktur bawah permukaan bumi pada daerah yang diteliti. Identifikasi yang digunakan adalah nilai tahanan jenis batuan yang dimodelkan karya tersebut. Sehingga didapatkan model bawah permukaan yang merepresentasikan keterkaitannya dengan sistem panas bumi.

Sekali lagi penulis mengucapkan terima kasih kepada para pembaca yang membaca karya ini. Apabila terdapat konten ataupun penulisan yang masih keliru, saran dan kritik sangat diharapkan dari pembaca kepada penulis. Agar pada kesempatan berikutnya penulis lebih berpengalaman dalam menulis sebuah karya ilmiah.

Surabaya, 2 Juli 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Aplikasi Inversi Pada Pengolahan Magnetotelurik	3
2.2 Geologi Daerah Penelitian	4
2.3 Resistivitas Batuan Pada Survei Magnetotelurik	6
2.4 Sistem Panas Bumi	7
2.5 Prinsip Dasar Metode Magnetotelurik	8
2.6 Persamaan Maxwell	8
2.7 Tensor Impedansi.....	9
2.8 Modus <i>Transverse Electric</i>	11
2.9 Modus <i>Tranverse Magnetic</i>	12
2.10 <i>Skin Depth</i>	12
2.11 Pemodelan Inversi 2-D Magnetotelurik	13
2.12 Algoritma Inversi <i>Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)</i>	14
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Rencana Penelitian.....	17
3.2 Diagram Alir Penelitian	18
3.3 Desain Pengukuran Magnetotelurik.....	19
BAB 4 PENGOLAHAN DATA MAGNETOTELURIK	21
4.4.1 Pengolahan Data Mentah Magnetotelurik.....	21
4.4.2 Proses Seleksi <i>Crosspower</i>	26
4.4.3 Proses Penghalusan Data Magnetotelurik	28
4.4.4 Koreksi Efek Statik	30
4.4.5 Pemodelan Inversi 2 Dimensi Magnetotelurik.....	32

BAB 5 PEMBAHASAN	36
6.1 Resistivitas Semu Magnetotelurik	37
6.2 Fase Magnetotelurik	39
6.3 Hubungan <i>Resistivitas</i> Semu dan Fase Magnetotelurik.....	40
6.4 Efek Statik Pada Data Magnetotelurik	41
6.5 Model Inversi 2 Dimensi Magnetotelurik	44
BAB 6 KESIMPULAN	59
6.1 Simpulan.....	59
6.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Model Awal Data Magnetotelurik (Budiraharjo dkk, 2017)	3
Gambar 2. 2	Model Inversi Data Magnetotelurik (Budiraharjo dkk, 2017).....	3
Gambar 2. 3	Peta Geologi Lapangan Panas Bumi (Kholid dkk, 2011).....	4
Gambar 2. 4	Rentang nilai resistivitas batuan (Palacky, 1987)	6
Gambar 2. 5	Sistem Panas Bumi (Dickson and Fanelli, 2004)	7
Gambar 2. 6	TE <i>mode</i> (Unsworth, 2007).....	11
Gambar 2. 7	TM <i>mode</i> (Unsworth, 2007).....	12
Gambar 2. 8	Konsep 2-D MT (Fiona dan Karsten, 2005)	14
Gambar 3. 1	Diagram Alur Pengolahan MT	18
Gambar 3. 2	Peta sebaran titik ukur MT	20
Gambar 4. 1	Kurva data time series pengukuran magnetotelurik	21
Gambar 4. 2	Tampilan waktu pengukuran magnetotelurik di lapangan	22
Gambar 4. 3	Konversi data domain waktu ke frekuensi	23
Gambar 4. 4	Time series to fourier transform.....	24
Gambar 4. 5	Prosess pengolahan pada tahap robust prossesing	25
Gambar 4. 6	Data MTLL-16 sebelum di seleksi <i>crosspower</i>	26
Gambar 4. 7	Data MTLL-16 setelah di seleksi <i>crosspower</i>	27
Gambar 4. 8	MTLL – 16 sebelum di <i>smoothing</i> D+.....	28
Gambar 4. 9	MTLL-16 Setelah di <i>smoothing</i> D+.....	28
Gambar 4. 10	MTLL-16 menggunakan <i>smoothing</i> numerical.....	29
Gambar 4. 11	MTLL-16 menggunakan <i>smoothing</i> Sutarno	29
Gambar 4. 12	MTLL-16 dengan kurva <i>rho apparent</i> XY dan YX.....	30
Gambar 4. 13	Data Magnetotelurik MTLL-16 sebelum dikoreksi efek static ..	32
Gambar 4. 14	Data magnetotelurik MTLL-16 setelah dikoreksi efek static	32
Gambar 4. 15	Model awal inversi 2 dimensi magnetotelurik	33
Gambar 4. 16	Kurva magnetotelurik yang telah dikoreksi efek statik	33
Gambar 4. 17	Parameter inversi 2 D Magnetotelurik	34
Gambar 4. 18	Hasil inversi 2-D MT lintasan 1 dengan RMS 1,56%	35
Gambar 4. 19	Hasil inversi 2-D MT lintasan 2 dengan RMS 2, 4 %	35
Gambar 4. 20	Hasil inversi 2-D MT lintasan 3 dengan RMS 1,8 %	35
Gambar 5. 1	Kurva <i>rho apparent</i> data MTLL-16A.....	38
Gambar 5. 2	Kurva fase data MTLL-16A	39
Gambar 5. 3	Kurva resistivitas semu dan fase pada data MTLL-22.....	40
Gambar 5. 4	Data MTLL-10 sebelum dikoreksi efek statik	43
Gambar 5. 5	Data MTLL-10 setelah dikoreksi efek statik.....	43
Gambar 5. 6	Forward model data magnetotelurik	44
Gambar 5. 7	Data observasi XY(TE) dan YX(TM).....	45
Gambar 5. 8	Parameter inversi 2-D menggunakan nilai tau dan lagrange.....	46
Gambar 5. 9	Parameter static shift, error floor, dan data error	47
Gambar 5. 10	Inversi 2-D MT lintasan 1	48

Gambar 5. 11	Inversi 2-D MT lintasan 2.....	48
Gambar 5. 12	Inversi 2-D MT lintasan 3.....	48
Gambar 5. 13	Inversi 2-D MT lintasan 4.....	49
Gambar 5. 14	Inversi 2-D MT lintasan 5.....	49
Gambar 5. 15	Inversi 2-D MT lintasan 6.....	49
Gambar 5. 16	Interpretasi MT lintasan 1.....	52
Gambar 5. 17	Interpretasi MT lintasan 2.....	53
Gambar 5. 18	Interpretasi MT lintasan 3.....	54
Gambar 5. 19	Interpretasi MT lintasan 4.....	55
Gambar 5. 20	Interpretasi MT lintasan 5.....	56
Gambar 5. 21	Interpretasi MT lintasan 6.....	57

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Rencana penelitian tugas akhir magnetotelurik	17
Tabel 3. 2	Koordinat Pengukuran Magnetotelurik.....	19
Tabel 5. 1	Koreksi efek static pada fekuensi 100 hz.....	42

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber daya panas bumi pada dasarnya berkaitan dengan aktivitas vulkanisme dan berasosiasi dengan fenomena tektonisme. Sistem panas bumi yang memiliki temperatur tinggi terletak di sepanjang zona pegunungan vulkanik dan diatas zona subduksi lempeng bumi. Subduksi antar lempeng memicu magma di lapisan mantel bumi menerobos kedalam lempeng bumi hingga menciptakan deretan gunung api. Magma yang terakumulasi dibawah gunung api akan menimbulkan transfer energi panas ke lapisan reservoir fluida. Di lapisan tersebut terjadi konveksi energi panas sebagai respon dari transfer energi panas yang berasal dari magma. Aliran energi panas secara konveksi menimbulkan pergerakan aliran fluida yang disebut dengan fenomena sirkulasi hidrotermal. Sirkulasi tersebut yang dimanfaatkan sebagai sumber daya panas bumi (Rahadinata dan Takodama, 2015).

Sistem panas bumi di Indonesia dikelompokkan menjadi tiga jenis meliputi sistem panas bumi vulkanik, vulkano-tektonik dan non-vulkanik. Sistem panas bumi vulkanik merupakan sistem panas bumi yang berasosiasi dengan gunung api yang berumur kuarter dan terletak di pegunungan vulkanik dari Sumatera, Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara, sebagian Maluku dan Sulawesi Utara. Sedangkan untuk vulkano-tektonik merupakan sistem panas bumi yang berasosiasi dengan struktur patahan graben dan kerucut vulkanik. Model sistem panas bumi tersebut dapat ditemukan didaerah Sumatera pada jalur sistem sesar semangko. Selanjutnya sistem panas bumi non-vulkanik merupakan sistem panas bumi yang berasosiasi dengan struktur patahan graben, aktivitas sesar, dan aktivitas sisa vulkanik. Secara umur geologi sistem panas bumi ini relatif lebih tua dari pada dua sistem sebelumnya dan sistem tersebut terdapat didaerah Sulawesi bagian barat dan selatan (Saptadji, 2009).

Identifikasi struktur bawah permukaan sistem panas bumi menggunakan metode magnetotelurik. Metode tersebut mengukur parameter fisis bawah permukaan meliputi medan magnetik dan listrik bumi. Data tersebut diterjemahkan menjadi nilai yang menggambarkan distribusi sifat fisis bawah permukaan yang merepresentasikan struktur bawah permukaan sistem panas bumi secara kualitatif dan kuantitatif. Secara kualitatif berarti menjelaskan tentang identifikasi sistem panas bumi berdasarkan warna – warna penciri anomali sedangkan kuantitatif lebih menekankan besaran sifat fisis yang terekam dan mengindikasikan hal tersebut. Sehingga untuk memperoleh gambaran model bawah permukaan bumi secara kuantitatif dan kualitatif diperlukan metode inversi (Grandis, 2013).

Inversi merupakan metode pengolahan data geofisika menggunakan persamaan matematis pada analisa respon fisis yang terekam. Pada dasarnya inversi merupakan solusi unik untuk memperoleh bentuk model pendugaan bawah permukaan bumi. Penerapan inversi dapat ditinjau pada pemodelan

sistem panas bumi menggunakan data magnetotelurik. Data pengukuran magnetotelurik belum cukup mendetailkan kondisi bawah permukaan, sehingga pengolahan data inversi dibutuhkan pada proses pengolahan data magnetotelurik. Pengolahan data tersebut menghasilkan model inversi yang menunjukkan rekonstruksi informasi bawah permukaan bumi. Keluaran dari model inversi magnetotelurik berupa model sistem panas bumi yang berdasarkan parameter terukur dari pengukuran magnetotelurik (Grandis, 2013).

1.2 Perumusan Masalah

Topik permasalahan pada penelitian ini tentang bagaimana pemodelan inversi 2-D data magnetotelurik pada lapangan panas bumi daerah “Basri”, Sulawesi Barat.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi tentang :

1. Pengolahan data magnetotelurik menggunakan model inversi 2 dimensi dengan batas rms yang diperoleh maksimal 5 %
2. Metode inversi yang digunakan pada penelitian ini adalah metode inversi *non linear conjugate gradient*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah analisa persebaran nilai resistivitas berdasarkan model inversi 2-D data magnetotelurik pada studi kasus lapangan panas bumi “basri” Sulawesi Barat.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh pada penelitian tersebut sebagai berikut.

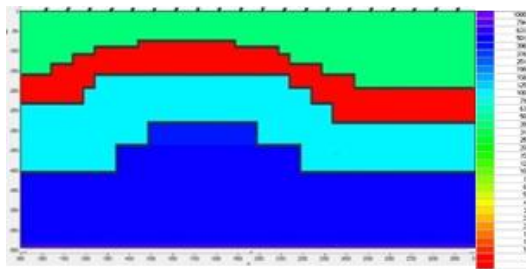
1. Hasil penelitian tugas akhir tersebut akan dijadikan jurnal penelitian ilmiah Geosaintek , Departemen Teknik Geofisika ITS.
2. Modul pengolahan data magnetotelurik berserta teori dasar magnetotelurik.
3. Menambah wawasan masyarakat umum tentang sistem panas bumi yang ditinjau dari metode magnetotelurik.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

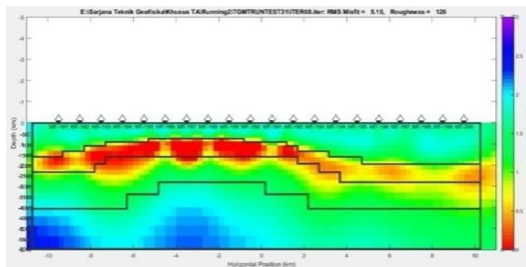
Tinjauan pustaka merupakan bagian fundamental pada penulisan karya ilmiah yang bertujuan untuk memperkuat topik penelitian ilmiah. Adapun pada penelitian ini menggunakan tinjauan pustaka yang meliputi penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik penelitian ini, informasi geologi daerah penelitian, dan teori dasar magnetotelurik. Semua bagian tersebut ditampilkan dalam bentuk sub bab yang dituliskan pada paragraf dibawah ini.

2.1 Aplikasi Inversi Pada Pengolahan Magnetotelurik

Permasalahan inversi dalam geofisika pada umumnya adalah inversi non linear. Meskipun demikian pada beberapa kasus permasalahan inversi dapat dipilih atau dibuat menjadi linier ataupun non linier tergantung parameterisasi model yang dipilih. Untuk diperoleh solusi inversi atau model optimum dari proses pengolahan data maka diperlukan pertubasi secara iteratif pada proses inversi. Didalam pertubasi tersebut terdapat parameterisasi pembobotan, matriks yang digunakan, dan jumlah inisialisasi iterasi data yang diperlukan. Semua parameter tersebut diperlukan untuk diperoleh model akhir inversi data yang relevan dengan daerah penelitian nya. Oleh sebab itu dalam proses inversi pasti ada model awal yang digunakan acuan parameter awal inversi kemudian dicocokkan dengan proses inversi data yang berupa data kalkulasi dan observasi sehingga diperoleh model inversi (Budiraharjo dkk, 2017).



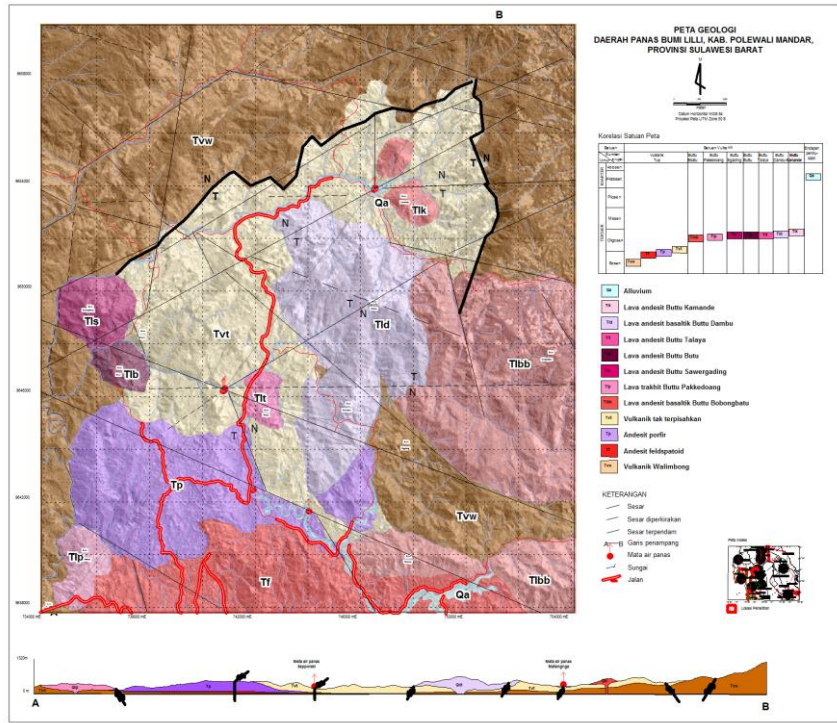
Gambar 2. 1 Model Awal Data Magnetotelurik (Budiraharjo dkk, 2017)



Gambar 2. 2 Model Inversi Data Magnetotelurik (Budiraharjo dkk, 2017)

2.2 Geologi Daerah Penelitian

Hasil penyelidikan panas bumi yang dilakukan oleh Tim Survei Pendahuluan Panas Bumi dari institusi Pusat Sumber Daya Mineral BatuBara dan Panas Bumi (PSDMBP), Badan Geologi – Kementerian ESDM tahun 2011 menghasilkan peta geologi lokal yang digunakan sebagai acuan dalam identifikasi sistem panas bumi daerah penelitian.



Gambar 2. 3 Peta Geologi Daerah Penelitian Panas Bumi Hasil Tim Survei PSDMBP (Kholid dkk, 2011)

Batuan di daerah penelitian didominasi oleh batuan vulkanik yang masih belum bisa ditentukan sumber erupsinya karena morfologi sumber erupsi belum dijumpai di daerah tersebut. Diidentifikasi lima satuan batuan di daerah ini yang terdiri dari lava andesit porfiri formasi Walimbong, lava trakhit, breksi lava andesistik, lava andesit dan alluvium (Kholid dkk, 2011).

Andesit porfiri tersingkap jelas di jalan sekitar Desa Sepporaki (daerah penelitian). Genesa batuan tersebut memiliki bentuk yang agak lapuk,

terkekarkan, sebagian terisi oleh urat kalsit. Batuan berwarna coklat terang, abu abu kecoklatan, bertekstur afanitik, porfiritik kasar dengan fenokris terdiri dari plagioklas, piroksen, biotit, mika, tertanam dalam masadasar gelas (Kholid dkk, 2011).

Lava trakhit tersingkap di dekat mata air panas Lilli (daerah penelitian) berwarna abu abu terang, bertekstur afanitik, porfiritik, fenokris terdiri dari feldspar, plagioklas, piroksen, tertanam dalam masadasar gelas. Kekar gerus banyak dijumpai di batuan ini. Disekitar mata air panas terkesikkan (silicified) dan sebagian besar terbreksikan (*brecciated*). Mata air panas tersebut muncul disatuan batuan tersebut (Kholid dkk, 2011).

Breksi lava andesitik dijumpai di sungai Niang (daerah penelitian). Sebagian besar terkekarkan. Batuan berwarna abu abu gelap kehitaman, terpilah buruk, fragmen terdiri dari batuan vulkddkanik berkomposisi andesit, basalt hingga trakhit. Masadasar berkomposisi andesitik, bertekstur afanitik, struktur vesikuler dijumpai di beberapa tempat (Kholid dkk., 2011).

Lava andesit tersingkap di sungai Masuni (daerah penelitian). Andesit berwarna abu abu terang, bertekstur afanitik, porifiritik, fenokris terdiri dari plagioklas, piroksen, tertanam dalam masadasar gelas (Kholid dkk, 2011).

Sesuai dengan susunan stratigrafinya maka karakteristik masing masing batuan disajikan dalam peta geologi (gambar 2.3) meliputi Batuan Vulkanik Walimbong (Tvw), Andesit Feldspatoid (Tf), Andesit Porfiri (Tp), Vulkanik tak terpisahkan (Tvt), Lava Andesit Basaltik Buttu Bobongbatu (Tlbb), Lava Trakhit Buttu Pakkedoang (Tlp), Lava Andesit Buttu Sawergading (Tls), Lava Andesit Buttu Butu (Tlb), Lava Andesit Buttu Talaya (Tlt), Lava Andesit Buttu Dambu (Tld), Lava Andesit Buttu Kamande (Tlk), Alluvium (Qal) (Kholid dkk, 2011).

Pola Struktur geologi di daerah penelitian ini diklarifikasikan menjadi tujuh pola struktur. Dari ketujuh pola struktur tersebut yang paling berperan penting dalam pemunculan manifestasi panas bumi adalah pola struktur N50-60⁰E dari manifestasi air panas di daerah penelitian. Diperkirakan terbentuk bukaan sesar pada perpotongan sesar ini sehingga menjadi media jalannya fluida hidrotermal ke permukaan (Kholid dkk, 2011).

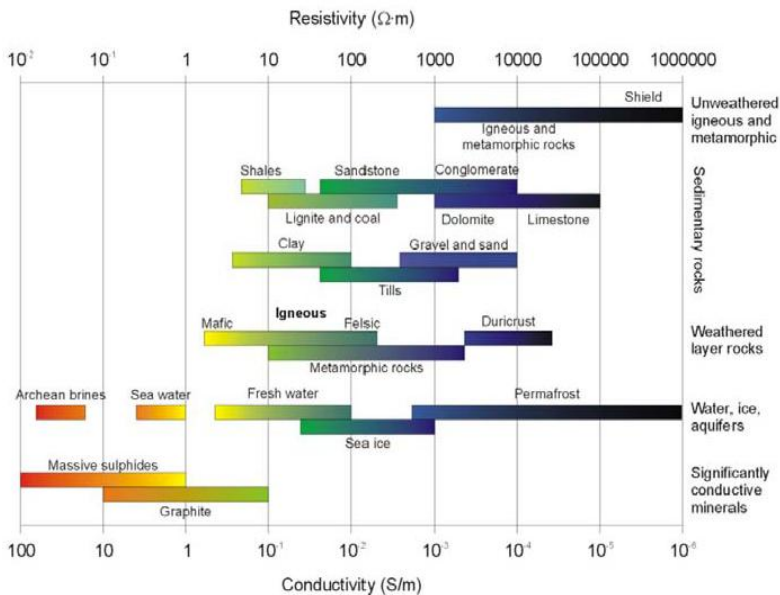
Selain itu dari pola pola struktur tersebut beberapa diantaranya teramati jenis pergerakan relative sesarnya yakni :

- a. Sesar mendatar yang terdiri dari 2 buah sesar mengiri (sinistral) dibagian selatan dan dua buah sesar menganan (dextral) dibagian utara.
- b. Sesar normal yang terdiri dari 5 buah sesar.
- c. Struktur depresi terdapat di daerah penelitian yang dicirikan sisa gawir yang membatasi depresi yang terbentuk melengkung hingga setengah radial. Dari bentuk morfologinya dan pola struktur secara regional, bentuk depresi ini diperkirakan sebagai hasil *collapse* dari sumbu perlipatan yang terbentuk sebelumnya. Sistem panas bumi di daerah

penelitian tersebut diperkirakan dibatasi oleh depresi ini, dimana manifestasi muncul didalamnya berupa mata air panas (Kholid dkk, 2011).

2.3 Resistivitas Batuan Pada Survei Magnetotelurik

Pengukuran magnetotelurik menghasilkan informasi tentang nilai resistivitas terhadap kedalaman. Nilai resistivitas yang dihasilkan memiliki rentang nilai paling rendah hingga tinggi. Nilai rendah adalah benda yang bersifat sangat konduktif sedangkan yang tinggi adalah benda yang bersifat resistif. Pada gambar 2.4 menunjukkan tentang gambaran umum material bumi yang memiliki sifat konduktif hingga resistif.

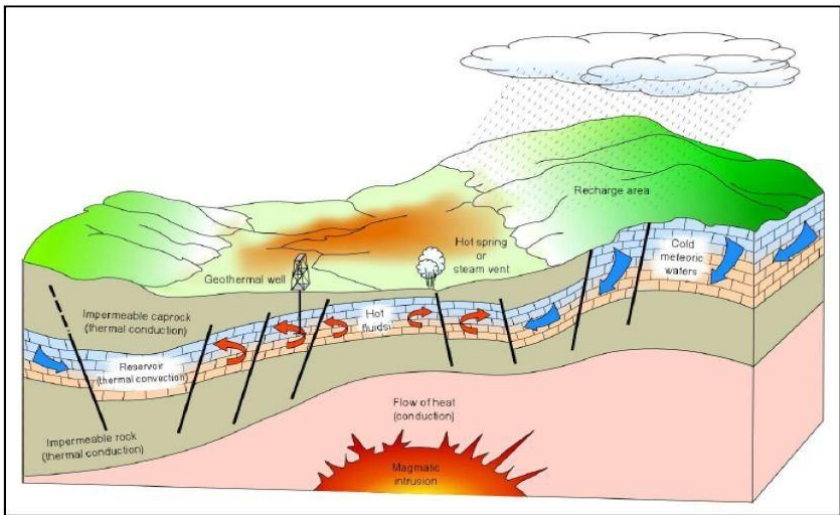


Gambar 2. 4 Rentang nilai resistivitas batuan (Palacky, 1987)

Nilai rentang resistivitas batuan yang digunakan pada pemodelan data magnetotelurik meliputi rentang nilai 10^{-2} – 1000000 ohm meter. Nilai tersebut digolongkan menjadi *cap rock*, reservoir, dan *heat source* pada studi kasus lapangan panas bumi. *Cap rock* memiliki nilai resistivitas sebesar 5 – 100 ohm meter, lapisan reservoir memiliki jangkauan sebesar 100 – 1000 ohm meter, dan *heat source* memiliki nilai diatas 1000 ohm meter (Palacky, 1987).

2.4 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi dapat digambarkan sebagai konveksi fluida pada kerak bumi teratas di mana dalam ruang terperangkap, transfer panas dari sumber panas (*heat source*) ke penyimpanan panas dalam keadaan permukaan yang bebas (*free surface*). Sistem panasbumi sendiri umumnya dibangun atas lima elemen utama yaitu *heat source*, *reservoir*, lapisan penudung, struktur geologi yang biasanya merupakan patahan dan terakhir adalah fluida yang merupakan pembawa panas seperti pada gambar 2.5 (Dickson and Fanelli, 2004).



Gambar 2. 5 Sistem Panas Bumi (Dickson and Fanelli, 2004)

Heat source merupakan sumber panas dari sistem panasbumi. *Heat source* bisa merupakan intrusi *magmatik* yang memiliki suhu yang sangat tinggi ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$) dimana kedalamannya yang relatif dangkal (3-5 km). *Reservoir* merupakan volume dari *hot permeable rocks*, tempat menyimpan panas dan tempat sirkulasi fluida yang mengekstrak panas. Di atas *reservoir* terdapat lapisan penudung atau biasa di sebut *cap rocks* yang merupakan lapisan *clay*. Lapisan *clay* merupakan lapisan impermeabel yang berfungsi untuk menjaga panas agar tetap terakumulasi di dalam zona *reservoir*. Fluida panasbumi adalah air, sebagian besar merupakan air *meteoric*. Sedangkan struktur geologi yang dimaksud merupakan rekahan atau patahan yang akan menjadi jalur dilaluinya fluida/ air dari permukaan menuju *reservoir* atau jalur yang akan dilalui uap panas atau fluida panas dari *reservoir* menuju permukaan dalam bentuk manifestasi permukaan. Terakhir adalah fluida

yang dalam hal ini merupakan air sebagai media penyimpanan panas (Dickson dan Fanelli, 2004).

2.5 Prinsip Dasar Metode Magnetotellurik

Metode magnetotellurik (MT) merupakan salah satu metode eksplorasi geofisika pasif yang memanfaatkan medan elektromagnetik alam. Medan EM tersebut ditimbulkan oleh berbagai proses fisik yang cukup kompleks sehingga spectrum frekuensinya sangat lebar (10^{-5} Hz – 10^4 Hz). Metode magnetotellurik (MT) merupakan salah satu metode geofisika yang dinilai paling baik digunakan dalam eksplorasi panas bumi karena kemampuannya untuk memetakan nilai resistivitas batuan sistem panas bumi. Metode tersebut mengukur dua komponen orthogonal medan listrik (E) dan dua komponen orthogonal medan magnet (B). Rasio dari medan listrik dan medan magnet merupakan nilai resistivitas semu yang kita kenal sebagai tensor impedan (Z). Tensor impedan magnetotellurik dapat didefinisikan sebagai berikut (Grandis, 2013) :

$$\begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Medan elektromagnetik alami (medan elektromagnetik primer) sebagai sumber metode magnetotellurik sampai ke bumi dengan memiliki variasi ke Bumi dengan memiliki variasi terhadap waktu. Medan elektromagnetik tersebut menginduksi *ore body* di bawah permukaan Bumi sehingga *eddy current* (arus *telluric*) yang menimbulkan medan elektromagnetik sekunder. *Receiver* (RX) yang berada di permukaan menangkap total medan elektromagnetik sebagai penjumlahan dari medan elektromagnetik primer dan medan elektromagnetik sekunder (Chave and Jones, 2012).

2.6 Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan sintesa hasil-hasil eksperimen (empiris) mengenai fenomena listrik- magnet yang didapatkan oleh Faraday, Ampere, Gauss, Coloumb disamping yang dilakukan oleh Maxwell sendiri. Penggunaan persamaan tersebut dalam metode MT telah banyak diuraikan dalam buku-buku pengantar geofisika khususnya yang membahas metode EM. Dalam bentuk differensial, persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dapat dituliskan sebagai berikut (Grandis, 2013),

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Hukum Faraday} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Hukum Ampere} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad \text{Hukum Gauss} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Hukum Gauss dalam magnetisasi} \quad (2.5)$$

Dimana ,

E : medan listrik (Volt/m)

B : fluks atau induksi magnetic (Weber/m² atau Tesla)

H : medan magnet (Ampere/m)

j : rapat arus (Ampere/m²)

D : pergeseran muatan listrik (Columb/m²)

q : rapat muatan listrik (Columb/m³)

Persamaan (2.2) diturunkan dari hukum Faraday yang menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik menyebabkan medan listrik dengan gaya gerak listrik berlawanan dengan variasi fluks magnetik yang menyebabkannya. Persamaan (2.3) merupakan generalisasi terorema Ampere dengan memperhitungkan hukum kekekalan muatan. Persamaan tersebut menyatakan bahwa medan magnet timbul akibat fluks total arus listrik yang disebabkan oleh arus konduksi dan arus perpindahan. Persamaan (2.4) menyatakan hukum Gauss yaitu fluks elektrik pada suatu ruang sebanding dengan muatan total yang ada dalam ruang tersebut. Sedangkan persamaan (2.5) yang identik dengan persamaan (2.4) berlaku untuk medan magnet, namun dalam hal ini tidak ada monopol magnetik (Grandis, 2013).

2.7 Tensor Impedansi

Impedansi merupakan perbandingan antara medan listrik dan medan magnetik. Pada metode magnetotellurik (MT), salah satu variable yang dicari yaitu tensor impedansi $Z(\omega)$. Secara umum, hubungan linier antara medan listrik, medan magnetik, dan impedansi dapat dirumuskan dengan persamaan berikut (Jupp and Vozoff, 1977):

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega)H_y(\omega) \quad (2.6)$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \quad (2.7)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

dimana $[Z]$ merepresentasikan tensor impedansi.

$H_x(\omega)$, $H_y(\omega)$, $E_x(\omega)$, dan $E_y(\omega)$ adalah transformasi Fourier dari perubahan medan magnetik (H) dan medan listrik (E). Apabila diasumsikan Bumi 1-D maka nilai impedansi dapat ditunjukkan pada persamaan (Jupp and Vozoff, 1977) :

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{k} = (1 + i) \left(\frac{\omega\mu}{2\sigma} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

dimana,

$$E_x = \text{medan listrik pada arah } x \left(\frac{V}{m} \right)$$

$$H_y = \text{medan magnet pada arah } y \left(\frac{A}{m} \right)$$

$$\omega = \text{frekuensi angular}$$

$$\mu = \text{permeabilitas magnetik} \left(\frac{H}{m} \right)$$

$$k = \text{bilangan gelombang}$$

Resistivitas semu, ρ_a , untuk lapisan Bumi dapat diperoleh dari persamaan berikut (Jupp dan Vozoff, 1977) :

$$\rho_a = \frac{1}{\omega \mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.10)$$

Apabila kita asumsikan Bumi seragam maka nilai resistivitas semu harus sama pada setiap frekuensi dan medan listrik akan berada di atas medan magnetik pada fase 45 derajat untuk semua frekuensi. Kemudian nilai resistivitas semu dan fase tersebut diplot pada grafik resistivitas semu terhadap frekuensi dan fase terhadap frekuensi. Dua modulus independen dari impedansi dianalisis untuk analisis pendekatan Bumi 2-D dalam sistem koordinat Kartesian dengan y searah dengan arah *strike* dan x tegak lurus terhadap arah *strike*. Modus *Transverse Electric* (TE) adalah modulus yang medan listriknya searah dengan *strike*, sedangkan modulus *Transverse Magnetik* (TM) adalah modulus yang medan magnetiknya searah dengan *strike*. Bagian diagonal dari impedansi tensor untuk pendekatan Bumi 2-D adalah nol (Fiona Simpson and Bahr, 2005).

$$[Z] = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

dimana,

$$Z_{yx} = Z_{TE} = \frac{E_y}{H_x} \quad (2.12)$$

$$Z_{xy} = Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.13)$$

Asumsikan data yang diperoleh dengan menggunakan sistem koordinat (x', y') dan sistem koordinat struktural (x, y) dimana y searah dengan *strike*, data MT dirotasi dari (x', y') ke (x, y) . Jika sudut rotasi dari (x', y') ke (x, y) adalah θ maka kita dapat menerapkan matriks rotasi (F. Simpson and Bahr, 2005) :

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

sehingga,

$$E = RE' \text{ dan } H = RH' \quad (2.15)$$

Sudut rotasi (θ) di atas dapat ditentukan dengan melakukan rotasi tensor impedansi secara meningkat atau dapat dihitung secara analitik berdasarkan persamaan berikut :

$$\theta = \frac{1}{4} \tan^{-1} \left(\frac{2R_1 R_2 + I_1 I_2}{R_1^2 + I_1^2 - R_2^2 - I_2^2} \right) \quad (2.16)$$

dimana,

$$\begin{cases} R_1 = R_e (Z_{xx} - Z_{yy}) \\ I_1 = I_m (Z_{xx} - Z_{yy}) \\ R_2 = R_e (Z_{xy} - Z_{yx}) \\ I_2 = I_m (Z_{xy} - Z_{yx}) \end{cases} \quad (2.17)$$

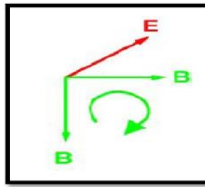
Tensor impedansi, \underline{Z} merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari bagian riil dan imajiner. Oleh karena itu, masing – masing komponen, Z_{ij} dan Z tidak hanya memiliki besar, tetapi juga memiliki fase sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut (Fiona dan Karsten, 2005) :

$$\rho_{a,ij}(\omega) = \frac{1}{\pi_0 \omega} |Z_{ij}(\omega)|^2 \quad (2.18)$$

$$\Phi_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{Z_{ij}\}}{\text{Re}\{Z_{ij}\}} \right) \quad (2.19)$$

2.8 Modus *Transverse Electric*

Pada mode ini komponen yang menunjukkan pada bidang arah sumbu y dan z hanya komponen magnetiknya saja sedangkan komponen medan listrik sejajar dengan arah struktur utama (Unsworth, 2007).



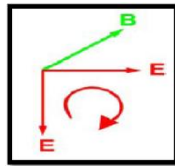
Gambar 2. 6 TE mode (Unsworth, 2007)

Dalam mode TE, arus listrik tidak akan mengalir melewati batas antara daerah yang memiliki nilai resistivitas yang berbeda, oleh karena itu komponen E_x akan kontinu terhadap bidang sumbu y, demikian juga dengan yang akan kontinu terhadap bidang sumbu y. Karena itulah TE mode sangat baik jika masih menggunakan analisa 1-dimensi (Unsworth, 2007).

Pada gambar 2.6 terlihat bahwa arus listrik hanya menginduksi bagian yang lebih konduktif. Hal ini disebabkan karena adanya efek konduktif dari arus yang muncul. Selain itu terlihat bahwa bagian yang memiliki resistivitas 10 ohm.m menghasilkan nilai resistivitas semu yang rendah dengan respon maksimal pada frekuensi 10 Hz. Sedangkan pada bagian yang memiliki resistivitas 1000 ohm.m hampir tidak terlihat adanya perbedaan resistivitas yang kontras (Unsworth, 2007).

2.9 Modus *Tranverse Magnetic*

Pada mode ini komponen yang menunjukkan pada bidang arah sumbu y dan z hanya komponen medan listrik saja sedangkan komponen medan magnet sejajar dengan arah struktur utama (Unsworth, 2007).



Gambar 2. 7 *TM mode* (Unsworth, 2007)

Pada TM mode, arus listrik akan melewati batas antara bagian yang memiliki perbedaan resistivitas. Dalam TM *mode* ini, terjadi fenomena efek konduktif yang terjadi juga pada TE *mode*, namun pada *mode* ini terjadi juga efek lain yaitu efek statik yang disebabkan adanya heterogenitas resistivitas medium, sehingga muatan-muatan terkumpul pada batas medium tersebut. Adanya efek statik tersebut menyebabkan nilai resistivitas semu pada frekuensi rendah (Unsworth, 2007).

2.10 *Skin Depth*

Salah satu sifat dari medan elektromagnetik adalah apabila medan elektromagnetik melewati lapisan konduktif maka energi dari medan elektromagnetik tersebut akan teratenuasi. Jarak tembus dari medan elektromagnetik tersebut juga akan berkurang mengikuti seberapa besar nilai konduktifitas dari lapisan konduktif ketika melewati lapisan tersebut, jarak maksimum yang dapat dicapai oleh medan elektromagnetik saat menembus lapisan konduktif ini dinamakan *skin depth*. Nilai *skin depth* dipengaruhi oleh resistifitas bahan dan frekuensi yang digunakan. Hubungan ini dapat ditulis sesuai dengan persamaan 2.8 (Grandis, 2013)

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.20)$$

2.11 Pemodelan Inversi 2-D Magnetotellurik

Survey magnetotellurik pada umumnya menggunakan beberapa stasiun pengukuran yang tersebar pada area studi. Pada tiap stasiun terdapat tiga komponen magnetik dan dua komponen elektrik, komponen-komponen tersebut digunakan untuk menghitung tensor impedansi dan vektor tipper bersamaan dengan *error*-nya masing-masing. Teknik *modern robust data-processing* digunakan untuk menghitung fungsi transfer dan *error* masing-masing (deviasi/penyimpangan) dari data *time series* (Grandis, 2013).

Pada kasus magnetotellurik 2D tensor impedansinya adalah sebagai berikut,

$$Z = \begin{Bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

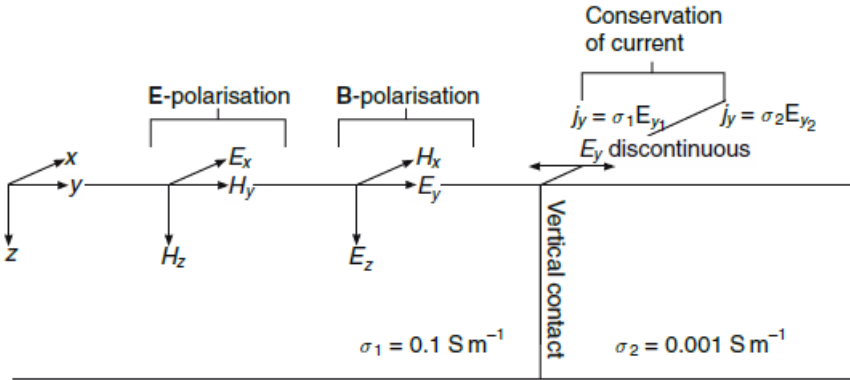
menghubungkan komponen horisontal dari elektromagnetik pada bidang permukaan pada satu posisi dan frekuensi tertentu, poros-x menunjukan arah *strike* (Chave dan Jones, 2012)

$$E_h = \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & Z_{TE} \\ Z_{TM} & 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_x \\ H_y \end{Bmatrix} = Z_{2D} H_h \quad (2.22)$$

dimana,

$$Z_{xy}(\omega) = Z_{TE} = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \quad (2.23)$$

$$Z_{yx}(\omega) = Z_{TM} = \frac{E_y(\omega)}{H_x(\omega)} \quad (2.24)$$



Gambar 2. 8 Konsep 2-D MT (Fiona dan Karsten, 2005)

Model yang menjelaskan MT 2D secara simpel ,terdiri dari dua model yang berdekatan dan memiliki kontak vertikal (batas planar yang memanjang tak hingga ke sumbu X. Konservasi dari arus yang melalui kontak dimana konduktivitas berubah dari σ_1 menjadi σ_2 kearah sumbu Y maka E_y (medan elektrik) akan terputus pada batas tersebut (Fiona dan Karsten, 2005).

Determinan dari tensor impedansi dapat dituliskan dalam persamaan berikut,

$$Z_{DET} = |Z_{DET}| \exp[i\phi_{DET}] = \sqrt{Z_{TE}(-Z_{TM})} = \sqrt{|Z_{TE}||Z_{TM}|} \exp\left[\frac{i}{2}(\phi_{TE} + \phi_{TM})\right] \quad (2.25)$$

Dimana resistivitas semu determinan,

$$\log \rho_{DET}^{app} = \frac{1}{2}(\log \rho_{TE}^{app} + \log \rho_{TM}^{app}) \quad (2.26)$$

Dan fase determinan adalah sebagai berikut,

$$\phi_{DET} = \frac{1}{2}(\phi_{TE} + \phi_{TM}) \quad (2.27)$$

Dengan mana 2D data determinan dipertimbangkan sebagai rata-rata dari mode TE dan TM (Fiona dan Karsten, 2005).

2.12 Algoritma Inversi Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)

Pada bagian ini akan menjelaskan secara singkat tentang teori inversi. Secara umum problem inversi adalah suatu cara yang dapat meminimumkan *error* kuadrat. Yaitu dengan menggunakan persamaan 2.28 (Rodi dan Mackie, 2001).

$$\|e\| = \|d - F(m)\|^2 \quad (2.28)$$

Dengan e adalah vektor *error*, F adalah vektor fungsi *forward modeling*, m adalah parameter model dan d adalah vektor data. Agar solusi menjadi stabil,

perlu persamaan tambahan sebagai fungsi penstabil. Penyelesaian problem dengan persamaan tambahan ini disebut fungsi regularisasi (Rodi dan Mackie, 2001). Persamaan regularisasi dapat dilihat pada persamaan 3.26. Ψ adalah fungsi objektif yang akan diminimumkan, $\|d-F(m)\|^2$ adalah *data misfit*, λ adalah pengali Lagrange, dan R adalah regularisasi yang berfungsi sebagai *stabilizer*.

$$\Psi(m, \lambda) = \|d-F(m)\|^2 + \lambda.R(m) \quad (2.29)$$

Inversi NLCG adalah suatu inversi yang terdiri dari 2 *loop*, yaitu *loop conjugate-gradient* dan *loop line-search* yang dapat meminimumkan suatu fungsi (Rodi & Mackie, 2001). *Loop* sekunder melakukan *line-search*. Minimisasi fungsi objektif menjadi problem minimisasi satu dimensi dengan parameter alfa ($\min \Psi(\alpha)$). *Line-search* inilah yang sifatnya non-linier (Rodi dan Mackie, 2001). Inversi NLCG lebih baik dalam meminimumkan fungsi dibandingkan dengan metode *steepest descent*. Yang mana metode *steepest descent* bergerak zig-zag dalam menurunkan fungsi. Sedangkan NLCG bergerak seperti arah *conjugate gradient*. Beberapa skema dalam *line-search* ini adalah:

1. Nilai fungsi objektif terkecil disimpan sebagai $\Psi_{\text{best}}(\alpha_{\text{best}})$.
2. Jika fungsi objektif dalam tahap iterasi *line-search* lebih besar dari Ψ_{best} , dilakukan bisection.
3. Sebaliknya, jika fungsi objektif iterasi saat ini lebih kecil dari Ψ_{best} , dilakukan pengecekan, apakah turunan beda tanda.

$$\alpha_{k+1} = \frac{1}{2}(\alpha_k + \alpha_{\text{best}}) \quad (2.30)$$

- 3.1. Jika turunan beda tanda, berarti mungkin kedua titik telah mengapit lokasi minimum. Untuk kasus ini dilakukan interpolasi kubik untuk aproksimasi lokasi minimum.
- 3.2. Jika turunan sama tanda, dilakukan aproksimasi kuadratik.

Iterasi *line-search* tersebut terus dilakukan hingga dipenuhi salah satu kriteria: jumlah iterasi *line-search* lebih besar dari 5 iterasi atau $|\Psi_{\text{best}} - \Psi| < 0.03 \Psi_{\text{best}}$. *Loop* utama adalah *loop conjugate gradient*. Dalam *loop* ini dihitung arah *conjugate*. Setelah arah *conjugate* ditemukan, dilakukan minimisasi 1-dimensi (*line-search*). Setelah minimisasi 1-dimensi selesai (untuk tiap iterasi), dilakukan pengecekan tiga *flag* (Rodi dan Mackie, 2001).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bagian metodologi penelitian secara keseluruhan meliputi rencana penelitian, diagram alir penelitian, dan desain pengukuran magnetotelurik. Ketiga komponen tersebut disajikan menjadi sub pokok bahasan. Rencana penelitian menjelaskan rentang waktu penelitian yang telah dilakukan. Diagram alir penelitian menjabarkan proses penelitian yang dilakukan. Selain itu disajikan desain survei metode magnetotelurik dengan tujuan memperkuat keaslian sumber informasi penelitian. Berikut ini merupakan ulasan singkat komponen metodologi penelitian yang dituliskan pada paragraph dibawah ini.

3.1 Rencana Penelitian

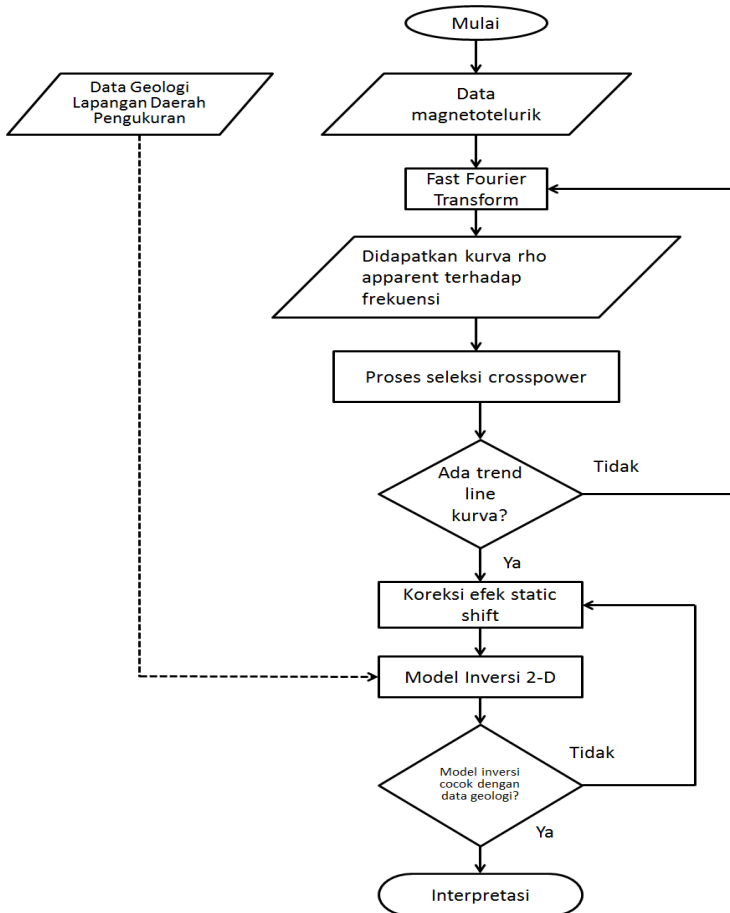
Rencana kegiatan penelitian tentang “Pemodelan Inversi Data Magnetotelurik Secara 2-D Pada Studi Kasus Sistem Panas Bumi Non Vulkanik Di Daerah “Penelitian” Sulawesi Barat” membutuhkan waktu satu bulan pengolahan di kantor PSDMBP dimulai tanggal 11 Maret – 16 April tahun 2018 dan untuk pembuatan laporan penelitian mengikuti prosedur di jurusan.

Tabel 3. 1 Rencana penelitian tugas akhir magnetotelurik

No	Kegiatan	Minggu ke-																Hasil Kegiatan
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	Persentasi Proposal Tugas Akhir																	Pemaparan topik penelitian tugas akhir
2	Studi konsep Magnetotelurik																	Persamaan Maxwell dan skindepth
3	Pengolahan data magnetotelurik di kantor PSDMBP																	Model inversi 2-D magnetotelurik
4	Analisa algoritma inversi magnetotelurik																	Persamaan algoritma inversi magnetotelurik.
5	Pembuatan laporan akhir dan persentasi akhir.																	Draft laporan akhir dan persentasi akhir.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Dibawah ini merupakan alur pengolahan data MT dari data mentah sampai hasil interpretasi sebagai berikut.



Gambar 3. 1 Diagram Alur Pengolahan MT

Diagram alur pengolahan MT menunjukkan bahwa proses pertama dalam pengolahan data merupakan proses perubahan data MT dalam domain waktu menjadi fungsi transfer atau domain frekuensi. Proses ini menggunakan persamaan *fast fourier transform* untuk merubah data mentah magnetotelurik menjadi kurva *rho apparent* terhadap frekuensi. Data tersebut kemudian

diseleksi *crosspower* disetiap rentang nilai frekuensinya hingga diperoleh hasil kurva XY dan YX. Proses berikutnya adalah koreksi efek statik diantara kurva XY dan YX. Proses tersebut memiliki tujuan agar mengurangi sifat ambiguitas pada data MT yang disebabkan oleh efek *static shift* sehingga pada pengolahan inversinya diperoleh data yang lebih detil. Kemudian dibuat parameter *inversi 2-D* meliputi parameter model awal dan parameter algoritma *Non Linear Conjugate Gradien (NLCG)*. Diperoleh hasil pemodelan data MT secara 2-D dan dicocokkan dengan data Geologi agar data pemodelan tersebut relevan dengan kondisi sebenarnya dilapangan.

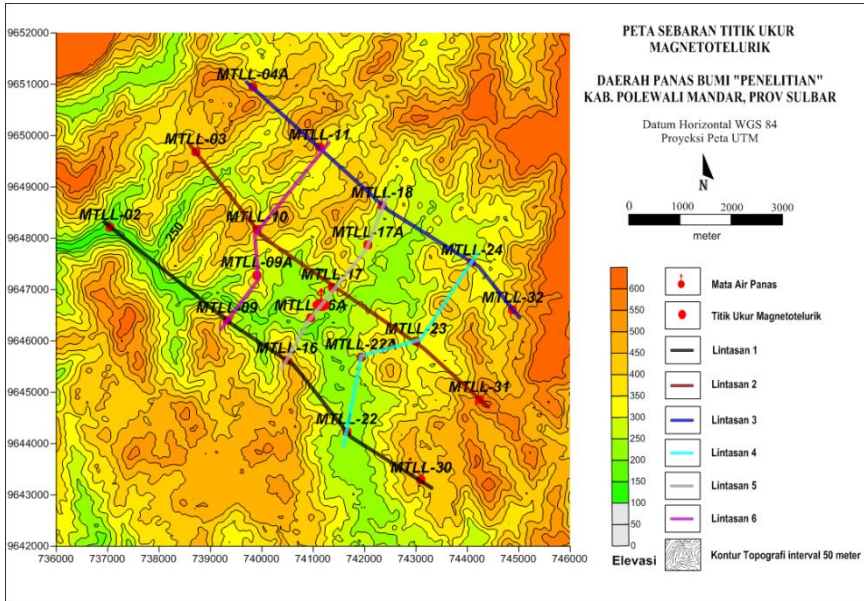
3.3 Desain Pengukuran Magnetotelurik

Pengukuran Magnetotelurik yang telah dilakukan oleh tim survey panas bumi PSDMBP sebanyak 36 titik pengukuran, namun dalam penelitian ini penulis mengambil 19 titik pengukuran. Sebaran titik ukur didesain untuk mencakup area terduga panas bumi pada daerah penelitian, jarak antar titik ukur 2000 meter, namun terdapat yang berjarak 1000 meter dikarenakan adanya pemindahan titik ukur yang disebabkan oleh medan yang sulit dijangkau oleh tim survey

Tabel 3. 2 Koordinat Pengukuran Magnetotelurik

No	Titik Ukur	X(meter)	Y(meter)	Elevasi(meter)
1	MTLL-02	7377046,7	9648210,67	170
2	MTLL-03	738708,28	9649685,77	415
3	MTLL-04A	739822,75	9650944,44	414
4	MTLL-09	739318,49	9646397,44	306
5	MTLL-09A	739904,05	9647282,99	348
6	MTLL-10	739904,02	9648169,66	423
7	MTLL-11	741119,29	9649769,24	395
8	MTLL-16	740489,81	9645613,27	428
9	MTLL-16A	740945,52	9646445,67	231
10	MTLL-17	741371,18	9647047,62	276
11	MTLL-17A	742065,94	9647871,99	277
12	MTLL-18	742341,86	9648642,06	282
13	MTLL-22	741652,39	9644228,15	221
14	MTLL-22A	741933,43	9645682,12	269
15	MTLL-23	742999,56	9645991,45	335
16	MTLL-24	744086,89	9647524,8	357
17	MTLL-30	743101,29	9643283,06	419
18	MTLL-31	744232,39	9644853,11	520
19	MTLL-32	744881,78	9646595,81	609

Selanjutnya desain pengukuran dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3. 2 Peta sebaran titik ukur magnetotelurik

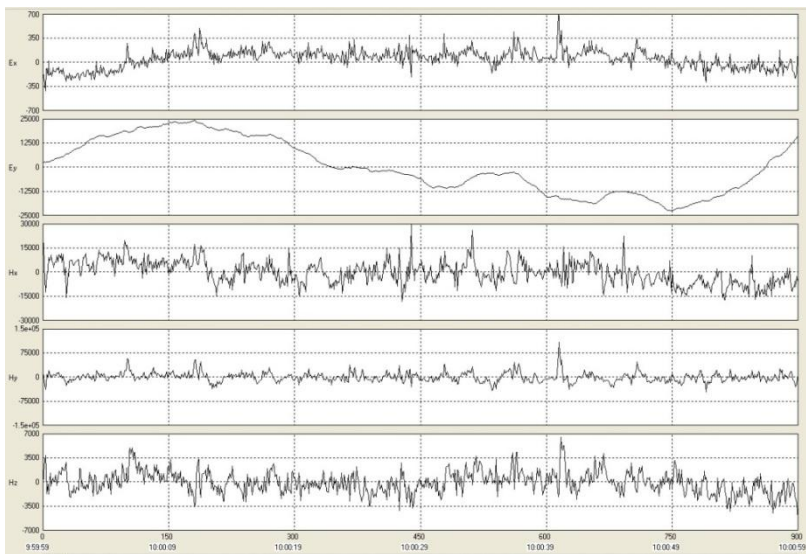
Lintasan pengukuran magnetotelurik terdiri dari enam lintasan. Lintasan pertama sampai dengan ketiga memiliki arah lintasan tenggara – barat laut. Kemudian lintasan keempat sampai dengan keenam memiliki arah lintasan timur laut barat daya. Lintasan pengukuran pertama mencakup titik ukur magnetotelurik MTLL-02, MTLL-09, MTLL-16, MTLL-22, MTLL-30. Kemudian lintasan pengukuran kedua mencakup titik ukur magnetotelurik MTLL-03, MTLL-10, MTLL-17, MTLL-23, MTLL-31. Selanjutnya lintasan ketiga mencakup titik ukur magnetotelurik meliputi titik ukur MTLL-04A, MTLL-11, MTLL-18, MTLL-24, dan MTLL-32. Lintasan keempat terdiri dari titik ukur MTLL-09, MTLL-09A, MTLL-10, MTLL-11. Lintasan kelima terdapat manifestasi panas bumi berupa mata air panas yang berdekatan dengan titik ukur MTLL-16A. Lintasan tersebut memiliki titik ukur MTLL-16, MTLL-16A, MTLL-17, MTLL-17A, dan MTLL-18. Terakhir lintasan keenam memiliki titik ukur MTLL-22A, MTLL-22, MTLL-23, MTLL-24.

BAB 4 PENGOLAHAN DATA MAGNETOTELURIK

Data magnetotelurik yang diolah pada penelitian tugas akhir menggunakan data hasil pengukuran tim PSDMBP. Terdapat 19 titik ukur magnetotelurik dengan enam lintasan pengukuran yang meliputi lintasan satu, dua, tiga, empat, lima, dan enam. Lintasan satu sampai tiga memiliki arah lintasan tenggara – barat laut dan lintasan empat sampai enam memiliki arah lintasan timur laut – barat daya. Lintasan kelima memotong daerah manifestasi panas bumi berupa mata air panas sedangkan lintasan lain tidak ada yang memotong daerah tersebut..

4.4.1 Pengolahan Data Mentah Magnetotelurik

Data pengukuran magnetotelurik berupa data *time series* yang diperoleh dari masing masing *coil* magnetik dan *porouspot*. Data dari *coil* magnetik merupakan respon pengukuran fluktuasi medan magnet alami bumi terhadap waktu dan data dari *porouspot* merupakan data medan listrik sekunder atau arus telurik terhadap waktu. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk kurva logger pengukuran seperti yang ditampilkan gambar 4.1 .

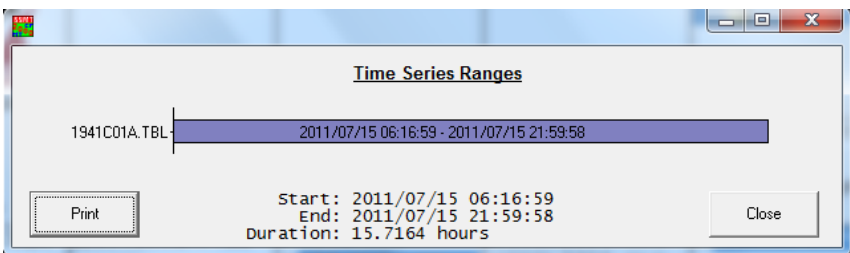


Gambar 4. 1 Kurva data time series pengukuran magnetotelurik

Respon pengukuran fluktuasi medan magnet bumi dapat dilihat pada komponen X, Y, Z *coil magnetic* (Hx, Hy, dan Hz). Komponen Hx dan Hy menunjukkan pengukuran medan magnet bumi secara lateral dipermukaan bumi sedangkan komponen Hz menunjukkan pengukuran medan magnet bumi dibawah

permukaan bumi. Kemudian untuk pengukuran medan listrik alami bumi atau arus telurik dapat dilihat pada bagian porousspot atau (E). Komponen porousspot terbagi menjadi dua yaitu komponen X dan Y. Kedua komponen tersebut merekam fluktuasi medan listrik bumi secara lateral dan vertikal kebawah permukaan bumi. Semua komponen *coil* magnet dan porousspot menunjukkan respon perubahan medan magnet dan listrik bumi terhadap waktu yang disajikan dalam bentuk kurva *timeseries*. Namun data tersebut belum bisa digunakan pada tahap identifikasi bawah permukaan, hanya digunakan untuk melihat kualitas data mentah pengukuran magnetotelurik. Jika data tersebut memiliki kurva *timeseries* yang kontinu maka data yang diperoleh relatif bagus. Tetapi jika data yang diperoleh terdapat kurva yang memiliki lonjakan atau turunan kurva yang drastis diindikasikan sebagai respon *noise* pengukuran MT.

Kedua nilai medan magnet dan listrik bumi yang berbentuk kurva domain waktu kemudian dikonversi menjadi data dalam domain frekuensi. Pada penelitian ini menggunakan aplikasi SSMT 2000 yang berfungsi sebagai media dalam mengkonversi data domain waktu menjadi data domain frekuensi. Dalam aplikasi ini sudah terdapat parameter transformasi fourier yang dapat digunakan dalam mengkonversi data. Langkah pertama dalam pengolahan di perangkat lunak SSMT yaitu membuat parameter *time series to fourier transform (TS to FT atau Make PFT)*. Proses tersebut berdasarkan rentang waktu pengukuran yang akan diolah, idealnya rentang waktu digunakan 8 jam. Bila waktu pengukuran nya berlebih maka dipotong hingga menjadi 8 jam waktu pengukuran. Tujuannya untuk memperoleh kualitas data yang lebih bagus. Apabila dibiarkan sesuai kondisi pengukuran yang sebenarnya maka terjadi ambiguitas data pada frekuensi terkecil, berupa pola kurva yang tidak membentuk pola yang halus. Selain itu tidak semua data waktu dipotong pada penelitian, melainkan titik ukur yang memiliki pola kurva domain frekuensi yang acak.



Gambar 4. 2 Tampilan waktu pengukuran magnetotelurik di lapangan

Gambar 4.2 merupakan informasi rentang waktu pengukuran magnetotelurik di titik ukur MTLL-16 yang memiliki rentang waktu pengukuran 15,7164 jam. Oleh sebab itu dipotong waktu pengukurannya dan memiliki durasi waktu pengukuran 8 jam, agar diperoleh pola kurva domain

frekuensi yang halus. Selain itu, pemotongan durasi waktu sangat berguna untuk meminimalisir kegagalan dalam proses konversi. Hal tersebut dikarenakan informasi pada jam jam terakhir pengukuran kurang bagus atau bisa jadi tidak ada data sama sekali, sehingga mengakibatkan kesalahan dalam proses konversi. Kesalahan tersebut berupa gagalnya proses konversi pada saat proses aplikasi tersebut berlangsung.

Parameter *time series to fourier transform* dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

MTU Processing MT(15Hz) data (SW ver. > A, Line Freq. = 50, MT sensors)

Input Data Type

☒ Measured field ☐ Parallel noise test

☐ White noise test ☐ Hourly files

Output Data Format

☒ 4 frequencies per octave

☐ 2 frequencies per octave

Bands (Levels)

☒ Process normal bands (levels) ☐ Process extended bands (levels)

☐ Process only band (level): 2

Band (Level)	Starting Frequency	Frequencies in Top Octave	Number of Octaves	Record Interval	Overlap
2	--	--	--	--	--
3	352.94118	1	4	1	1
4	35	3	3	4	1
5	5	4	4	30	1
6	0.3125	4	5	60	2
7	0.00976562	4	5	600	4
8	--	--	--	--	--

Processing Times

☐ Use default times

☒ Specify times Start from: 2011/07/15 06:16:59

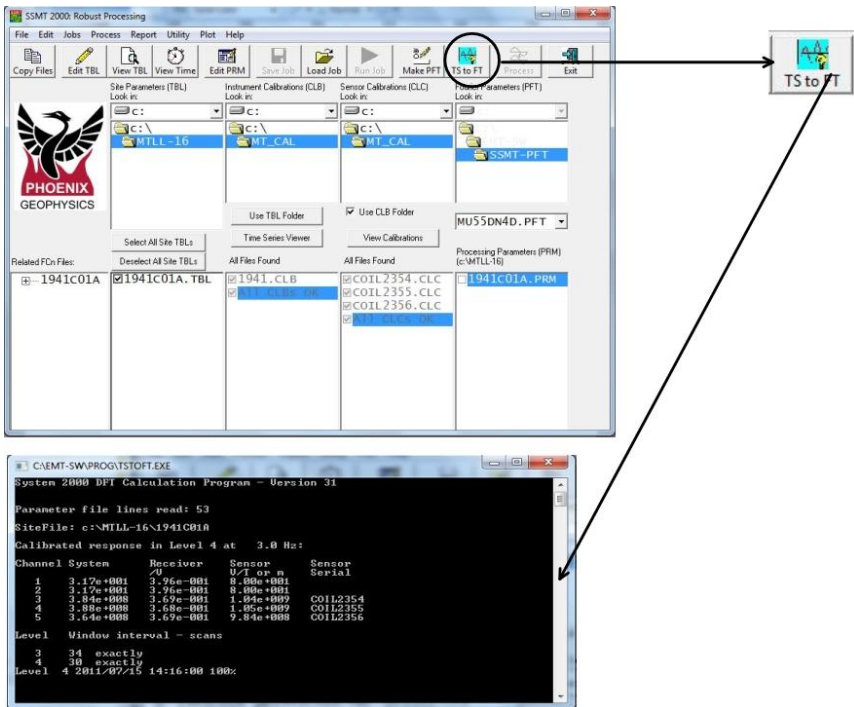
End at: 2011/07/15 14:16:59

File name: MU55DN4T.PFT

Save Close

Gambar 4. 3 Pengisian parameter dalam konversi data domain waktu ke frekuensi

Menu *input data type* berisikan pilihan data yang akan dikonversikan pada aplikasi ssmt 2000. Pada pengolahan data tersebut dipilih jenis data pengukuran lapangan atau *measured field*. Kemudian diklik *process normal bands level* dengan tujuan untuk memperoleh *decade* frekuensi dari rentang 352 hz sampai dengan 0,009 hz. Decade merupakan nilai konversi data magnetotelurik menjadi frekuensi dalam bentuk grid pencacahan frekuensi. Nilai tersebut dapat ditampilkan pada proses pengolahan seleksi croospower pada aplikasi MT Editor. Selain itu diatur spesifikasi waktu pengukuran yang akan diolah pada parameter *processing time* dengan rentang waktu yang diberikan pada pengolahan data tersebut sebesar delapan jam. Selanjutnya diklik tombol TS to FT untuk mengeksekusi perintah konversi data magnetotelurik dalam domain waktu menjadi domain frekuensi seperti pada gambar 4.4 .



Gambar 4.4 Pengolahan data magnetotelurik pada tahapan time series to fourier transform

Langkah selanjutnya membuat parameter pengolahan *robust processing*. Pengolahan tersebut pada dasarnya mirip dengan proses inversi least – square merupakan proses meminimalisir pengaruh data gangguan atau outliyer terhadap pola data magnetotelurik. Adapun cara meminimalisir hal tersebut menggunakan parameter robust prosesi yang meliputi mengatur koherensi data dari medan magnetik dan medan listrik, pembobotan data berdasarkan pola dominan dari data magnetotelurik, dan pemilihan jumlah *crosspower* yang dibutuhkan.

Koherensi data dari medan magnetik dan medan listrik idealnya mendekati nilai 1, tapi pada pengisian parameter pengolahan tersebut menggunakan nilai 0,85 yang berarti bahwa koherensi antara dua data medan magnetik dan medan listrik sebesar 85 %. Dengan asumsi bahwa data pengukuran yang diperoleh memiliki nilai koherensi yang mayoritas sangat bagus. Koherensi merupakan nilai dari pola data pengukuran magnetotelurik, apabila menunjukkan perubahan pola yang kontinyu maka diasumsikan memiliki tingkat kekoherenitas yang bagus. Hal itu dapat dilihat pada kurva

Kemudian pembobotan dilakukan apabila hasil konversi data domain frekuensi memiliki pola yang acak. Parameter pembobotan yang digunakan adalah pembobotan *rho variance*. Pembobotan tersebut berdasarkan ragam nilai *rho apparent* yang muncul pada setiap pencacahan nilai frekuensi data magnetotelurik, sehingga data yang memiliki nilai menyimpang dari pola kurva akan dibobotkan mendekati kurva tersebut.

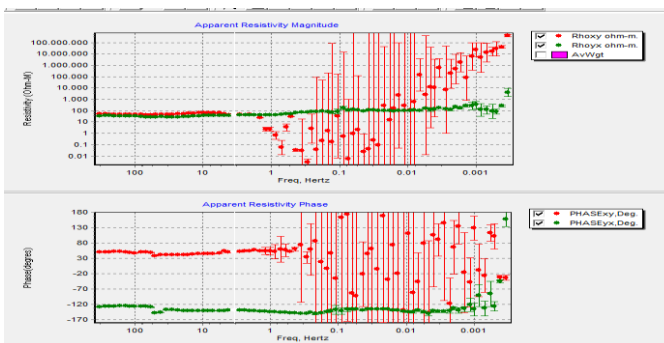
The screenshot displays the SAM2 2020 software interface. The main window shows various calibration and processing parameters. The 'Edit PRM' window is open, showing the 'Processing Parameters (PRM)' tab. The 'PRM' file is '1941C01A.PRM'. The 'Processing Parameters (PRM)' window shows various settings for the '1941C01A.PRM' file, including 'Processing Parameters (PRM)' and 'Processing Parameters (PRM)'.

25

4.4.2 Proses Seleksi *Crosspower*

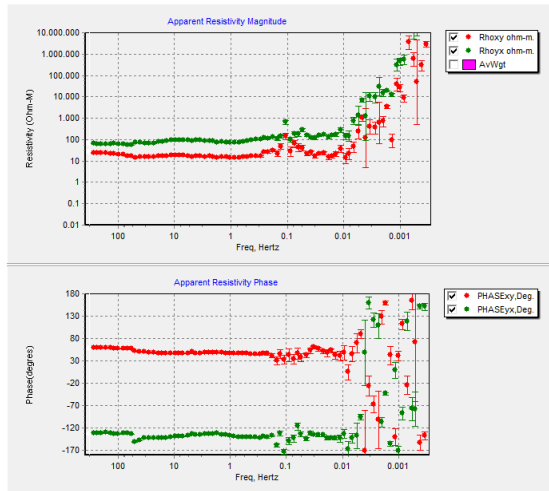
Pengolahan data selanjutnya adalah seleksi *croosspower* di aplikasi MT Editor. Tujuan dari seleksi *crosspower* untuk merubah pola data magnetotelurik yang semula relatif acak menjadi berpola halus. Seleksi *crosspower* ini berdasarkan jumlah *crosspower* yang digunakan pada proses pengolahan sebelumnya. Apabila dirasa pola data magnetotelurik relatif bagus maka menggunakan *crosspower* yang bernilai antara 20 sampai 60 *croosspower*. Namun apabila ditemukan data magnetotelurik yang memiliki pola acak maka disarankan memakai *crosspower* yang bernilai 100. Perlu diperhatikan juga dalam memilih *croosspower* pada setiap titik frekuensi yaitu mempertimbangkan pola kurva fase, kurva *rho apparent* terhadap frekuensi, dan *error bar*.

Idealnya pola kurva fase akan relatif sama mengikuti pola sebelumnya, misal pola kurva awal menunjukkan derajat fase sebesar 60^0 dari frekuensi 320 hz sampai frekuensi 1 hz dan mulai pecah polanya dibawah 1hz sampai 0,001 hz, maka diasumsikan pola selanjutnya mengikuti trend data yang memiliki nilai derajat fase yang sama. Begitu juga pada seleksi *croosspower* di kurva *rho apparent* terhadap frekuensi. Apabila trend semula kurva *rho apparent* menunjukkan kenaikan secara polinom dari rentang *resist* 10 ohm sampai 1000 ohm, maka kurva yang mengalami pola acak dibuat pola kurva yang mengikuti trend sebelumnya. Selain itu diperhatikan juga *besaran error bar* yang terlihat pada proses seleksi tersebut. Idealnya setiap kurva memiliki *error bar* yang relative kecil, namun bila setelah diseleksi masih belum menunjukkan pola yang diharapkan maka hasil tersebut merupakan pola alami dari data magnetotelurik. Selain itu *error bar* merupakan informasi yang menunjukan tingkat keambiguanitas pada sebuah kurva, jika semakin besar maka data tersebut memang bersifat ambigu namun bila semakin kecil rentang *error barnya* maka kurva tersebut menunjukkan pola yang bagus. Adapun gambar hasil pengolahan sebelum dan sesudah diseleksi *crosspower* sebagai berikut.



Gambar 4. 6 Data MTLL-16 sebelum di seleksi *crosspower*

Garis – garis merah pada data MTLL-16 menunjukkan *error bar*, terlihat data tersebut memiliki pola *error bar* yang tinggi pada bagian frekuensi 0,1 hz-0,001 hz. Selain itu data tersebut terdapat pola kurva yang pecah pada rentang frekuensi tersebut. Pecahnya kurva tersebut dan eror bar akan dibahas lebih lanjut pada bab pembahasan.



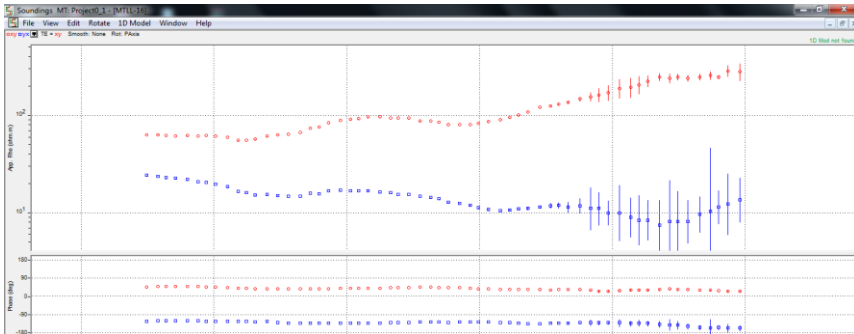
Gambar 4. 7 Data MTLL-16 setelah di seleksi *crosspower*

Pengolahan seleksi *croospower* tersebut menggunakan asumsi rotasi tensor. Rotasi tensor merupakan rotasi kurva data magnetotelurik terhadap arah struktur utama yang berupa patahan pengontrol manifestasi panas bumi, arah strike struktur, dan sesar yang menimbulkan manifestasi panas bumi. Pada penelitian ini menggunakan rotasi tensor sebesar 60^0 terhadap arah struktur yang mengontrol manifestasi panas bumi. Derajat rotasi ini diperoleh dari informasi geologi penelitian yang menyebutkan bahwa daerah penelitian ini memiliki sebuah sesar yang berarah N 60^0 E pada manifestasi panas bumi yang berupa mata air panas. Rotasi tensor tersebut akan mempengaruhi pola kurva data magnetotelurik. Apabila tidak dicantumkan rotasi tersebut maka data yang diolah tidak menunjukkan informasi struktur yang sebenarnya. Sebab pada dasarnya pengolahan data magnetotelurik sangat mempertimbangkan pola struktur pengontrol daerah sistem panas bumi. Sehingga hasil yang diperoleh berdasarkan bukti tersebut akan memperkuat dugaan struktur bawah permukaan bumi yang begitu kompleks.

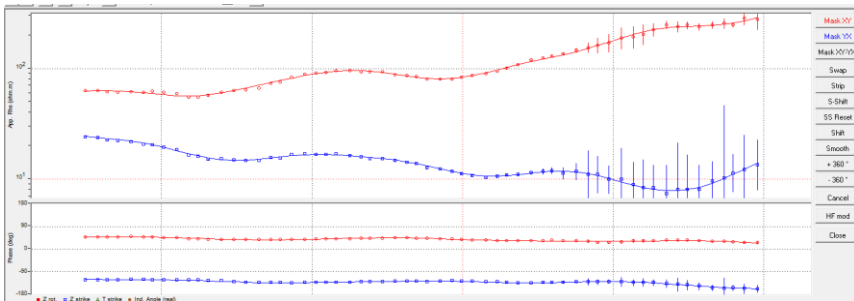
Hasil pengolahan seleksi *croospower* dapat dilihat di halaman lampiran, dan langkah berikutnya adalah tahap penghalusan data menggunakan parameter *smoothing*. Parameter ini akan dijelaskan pada sub bab berikutnya.

4.4.3 Proses Penghalusan Data Magnetotelurik

Data yang telah diseleksi *crosspower* selanjutnya diolah pada aplikasi WinGlink untuk pengolahan *smoothing* kurva *rho apparent* terhadap frekuensi. Pengolahan tersebut merupakan tahap lanjut dari hasil pengolahan sebelumnya di MT Editor. Parameter yang digunakan dalam proses *smoothing* tersebut terdapat tiga pilihan yang meliputi *smoothing* D+, Sutarno, dan Numerical. *Smoothing* D+ merupakan proses penghalusan kurva data magnetotelurik berdasarkan pola kurva *rho apparent* terhadap pola kurva derajat fase magnetotelurik. Proses ini juga melibatkan parameter *error bar* sebagai dasar dalam proses penghalusan pola kurva, semakin besar *error barnya* maka hasil *smoothingnya* akan menghasilkan kurva *smoothing* yang semakin menjauhi dari pola kurva data observasi. Sebab pada dasarnya, D+ dapat menduga bentuk kurva tersebut dengan mempertimbangkan efek *error barnya* pada kurva *rho apparent* dan derajat fase.



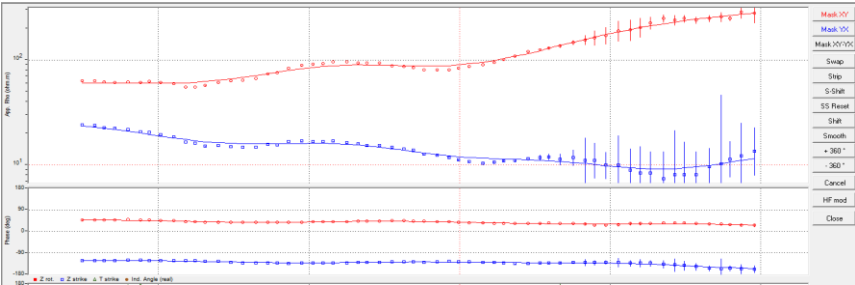
Gambar 4. 8 Data magnetotelurik MTLL – 16 sebelum di *smoothing* D+



Gambar 4. 9 Data magnetotelurik MTLL-16 Setelah di *smoothing* D+

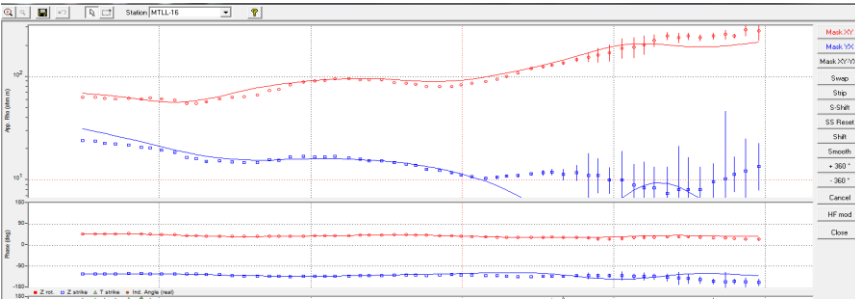
Sedangkan untuk *smoothing numerical* merupakan proses penghalusan data berdasarkan pola kurva observasi. Apabila data yang diperoleh memiliki pola yang acak maka *smoothing* ini akan membentuk kurva *smoothing* yang

acak juga, sehingga tidak direkomendasikan dalam melakukan proses penghalusan data, kecuali data pengukuran yang diperoleh memang dalam kondisi yang sangat bagus. Selain itu pada *smoothing numerical* ini menggunakan pendekatan secara *numeric* pada setiap pola kurvanya. Pendekatan tersebut berupa persamaan polinomial dengan nilai *orde* tertentu. Semakin besar nilai *orde* yang dimasukkan dalam proses *smoothing numerical* maka bentuk kurvanya berbentuk polinomial, seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 10 Data magnetotelurik MTLL-16 menggunakan *smoothing numerical*.

Pengolahan *smoothing sutarno phase consistens* atau *sutarno* merupakan proses penghalusan data magnetotelurik berdasarkan fase derajat data magnetotelurik. Apabila pola kurva fase tersebut relatif konsisten maka hasil dari proses *smoothing* tersebut menunjukkan respon kurva yang bagus. Namun apabila pola kurva fasenya acak, maka *smoothingnya* akan menunjukkan respon pola kurva yang acak juga. Berdasarkan hal tersebut dapat diketahui bahwa parameter *smoothing* tersebut sangat bergantung pada pola kurva fase magnetotelurik, jika pola kurvanya bagus maka respon dari *smoothing* tersebut akan menunjukkan hal yang sama. Oleh sebab itu *smoothing sutarno* dipilih jika kurva fase magnetotelurik menunjukkan pola yang stabil tidak menunjukkan pola yang acak.

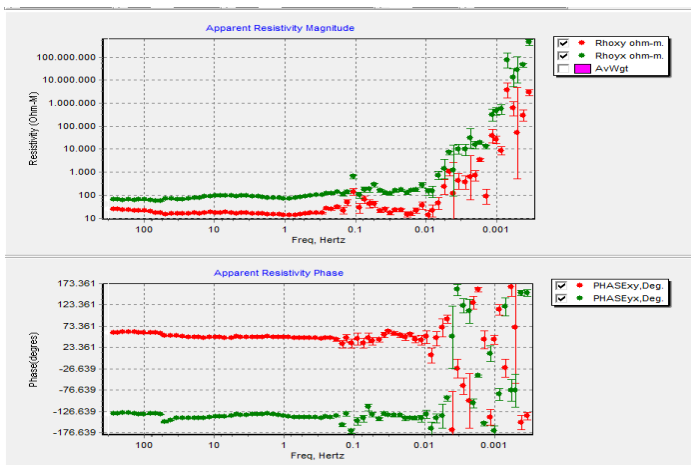


Gambar 4. 11 Data magnetotelurik MTLL-16 menggunakan *smoothing Sutarno*

Pengolahan data magnetotelurik pada penelitian ini menggunakan parameter *smoothing D+* untuk semua data observasi magnetotelurik. Parameter *smoothing* tersebut sebagai acuan untuk melakukan penghalusan kurva data magnetotelurik hingga diperoleh pola kurva yang lebih halus, hasil tersebut dapat dilihat pada halaman lampiran. Hasil pengolahan *smoothing* tersebut akan dilanjut ketahap pengolahan selanjutnya yaitu koreksi efek statik pada sub bab selanjutnya.

4.4.4 Koreksi Efek Statik

Pengolahan data magnetotelurik akan menghasilkan dua informasi yang terdiri dari informasi *transverse electric* atau TE mode dan *transverse magnetic* atau TM mode. Kedua informasi ini dapat dilihat pada kurva *rho apparent* dan derajat fase. Pada kurva *rho apparent* terbagi menjadi dua kurva yaitu *rho apparent XY* atau kurva TE mode dan YX atau kurva TM mode. Begitu juga hal yang sama pada bagian kurva derajat fase. Masing masing kurva XY dan YX memiliki kecenderungan pola kurva yang berbeda, tapi idealnya kedua kurva tersebut saling berimpit. Namun pada studi kasus di pengukuran sebenarnya kedua kurva tersebut jarang ditemui berimpit. Hal ini menyebabkan informasi bawah permukaan menjadi ambigu yang disebabkan oleh nilai *rho apparent* kedua kurva tidak memiliki kemiripan, seperti pada gambar dibawah ini. Solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut menggunakan koreksi efek statik.



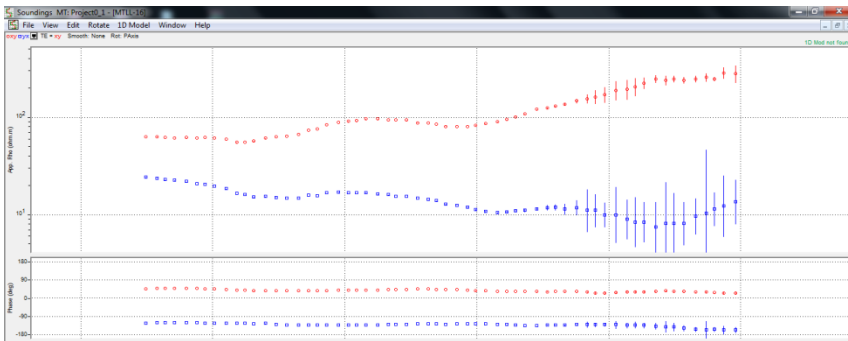
Gambar 4. 12 Data magnetotelurik MTLL-16 dengan kurva *rho apparent XY* (kurva merah) dan YX(kurva hijau)

Fenomena kerancuan data magnetotelurik disebabkan pengaruh efek statik regional pengukuran. Efek tersebut menyebabkan data observasi MT tidak berhimpit. Solusi untuk menyelesaikan hal tersebut menggunakan koreksi statik berdasarkan data pendukung TDEM (*time domain elektromagnetik*) atau data VES (*Vertical Electronic Sounding*). Tujuan dari kedua data tersebut untuk memberi nilai *rho apparent* sebenarnya sebagai acuan dalam koreksi statik pada data magnetotelurik. Koreksi tersebut dilakukan dengan cara menggeser kurva *rho-apparent* XY atau YX kenilai *rho-apparent* terukur dari VES atau TDEM. Hasil dari pergeseran tersebut akan membuat kedua kurva akan saling berhimpit dan efek statik dapat dilihat.

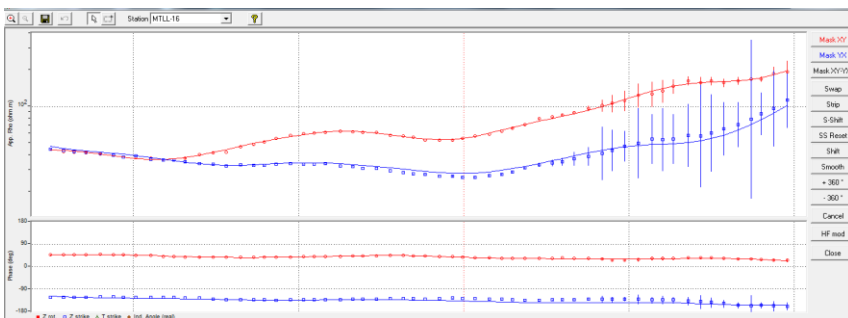
Solusi lain dari kedua metode tersebut adalah koreksi statik dengan metode perataan. Koreksi tersebut menggunakan pendekatan matematis berupa nilai median dari kedua kurva antara kurva *rho apparent* XY dan YX. Setelah didapatkan nilai *rho apparent* dari median tersebut, kedua kurva tersebut dihimpitkan pada nilai tersebut hingga kedua kurva tersebut saling berhimpit, sehingga efek statik dapat dihilangkan. Terdapat kelemahan dari metode ini yaitu metode median hanya menggunakan persamaan matematis pada data terukur magnetotelurik dengan asumsi bahwa secara regional data yang diperoleh dari pengukuran relatif sama informasinya. Padahal semua daerah pengukuran memiliki respon yang berbeda setiap pengukuran berlangsung. Oleh sebab itu diperlukan data tdem dan ves untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dalam koreksi efek statik. Namun bila tidak ada maka menggunakan pendekatan metode median dalam koreksi efek statik, seperti pada tabel dan gambar dibawah ini.

Tabel 4. 1 Koreksi efek statik menggunakan metode median pada lintasan pengukuran 2

No	Stasiun	XY(rhoapp)	YX(rhoapp)	Median
1	MTLL-03	berimpit	berimpit	berimpit
2	MTLL-09A	65.9	0.8	33.35
3	MTLL-10	8.2	169.1	88.65
4	MTLL-16A	berimpit	berimpit	berimpit
5	MTLL-17	55.8	118.7	87.25
6	MTLL-22	118	55.5	86.75
7	MTLL-23	34.8	29.5	32.15
8	MTLL-31	24.5	52.3	38.4



Gambar 4. 13 Data Magnetotelurik MTLL-16 sebelum dikoreksi efek static

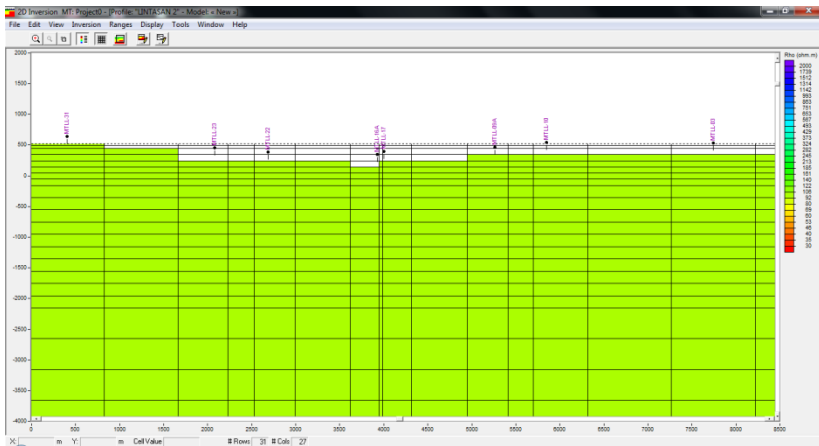


Gambar 4. 14 Data magnetotelurik MTLL-16 setelah dikoreksi efek static

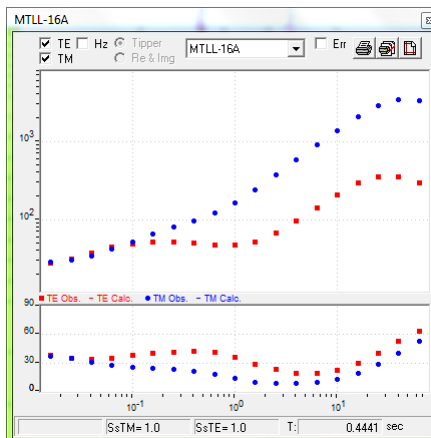
4.4.5 Pemodelan Inversi 2 Dimensi Magnetotelurik

Tahapan selanjutnya adalah pemodelan data magnetotelurik menjadi model inversi 2 dimensi. Parameter pemodelan inversi meliputi data ρ_{apparent} , derajat fase, batas error, koreksi efek static, dan fungsi regularisasi atau nilai tau. Pada proses inversi ini menggunakan algoritma non linear conjugate gradient yang berfungsi sebagai fungsi objektif dalam proses inversi ini berlangsung, penjelasan algoritma ini akan dibahas bab berikutnya.

Pemodelan ini menggunakan aplikasi WinGlink dengan parameterisasi inversi sebagai berikut. Langkah pertama membuat model awal terlebih dahulu, prinsip model awal pada inversi ini menggunakan sistem meshgrid, dimana akan bertambah nilai dan ukuran mesh terhadap kedalaman. Kemudian diaktifkan pilihan parameter edit static shift yang berfungsi untuk menyertakan hasil koreksi efek statik pada pengolahan data magnetotelurik, seperti pada gambar 4.15 – 4.17.

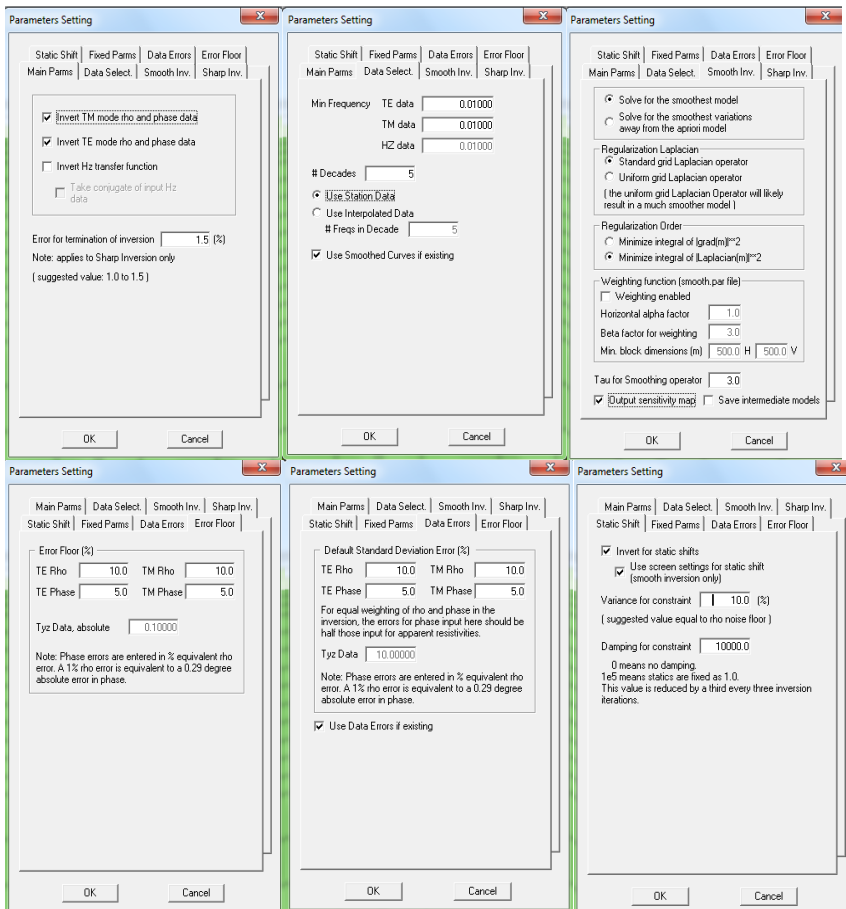


Gambar 4. 15 Model awal inversi 2 dimensi magnetotelurik



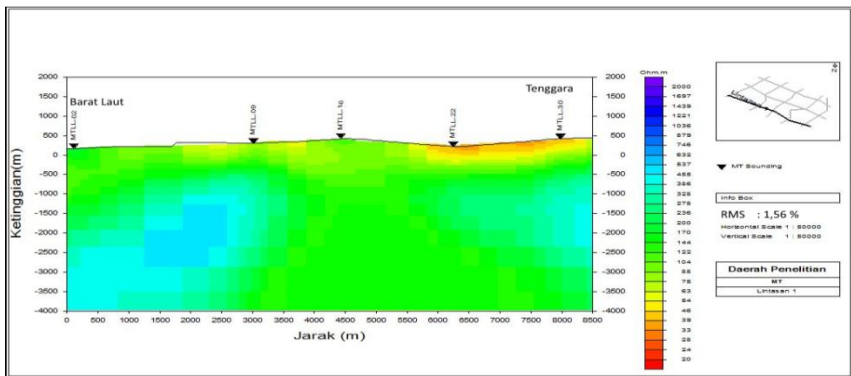
Gambar 4. 16 Kurva magnetotelurik yang telah dikoreksi efek statik

Tahap selanjutnya baru melakukan parameterisasi proses inversi seperti pada gambar 4.17 .

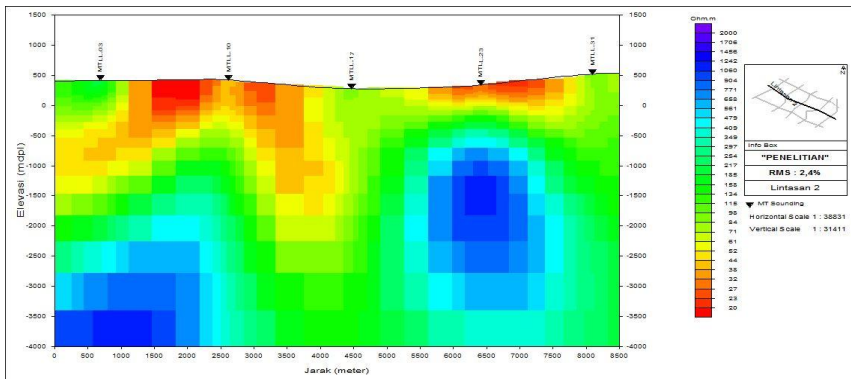


Gambar 4. 17 Parameter inversi 2 D Magnetotelurik

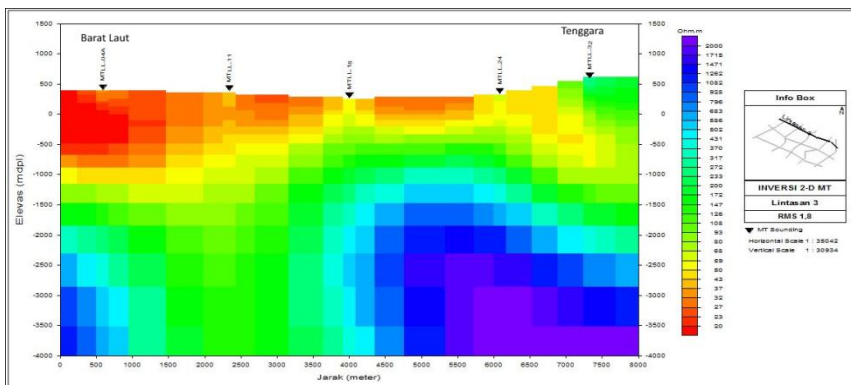
Parameter inversi yang digunakan dalam software ini meliputi kurva TE dan TM data magnetotelurik, metode *smoothness-constraint* menggunakan nilai tau 3.0, kemudian membuat batas error sebesar 10 % dan membuat batas error untuk koreksi efek static sebesar 10 %. Kemudian diperoleh hasil inversi sebagai berikut.



Gambar 4. 18 Hasil inversi 2-D magnetotelurik lintasan 1 dengan RMS 1,56%



Gambar 4. 19 Hasil inversi 2-D magnetotelurik lintasan 2 dengan RMS 2, 4 %



Gambar 4. 20 Hasil inversi 2-D magnetotelurik lintasan 3 dengan RMS 1,8 %

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5 PEMBAHASAN

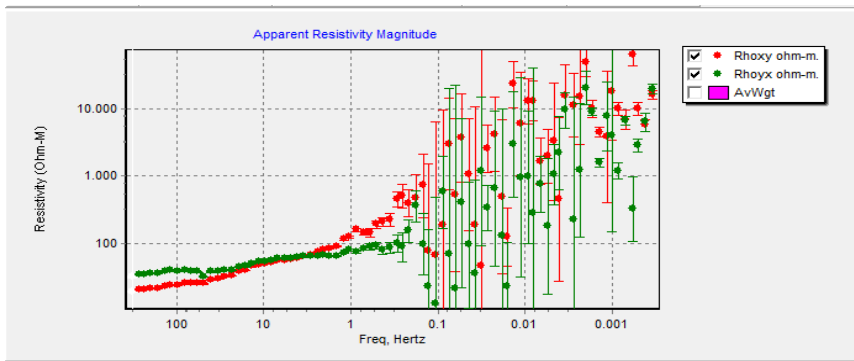
Parameter utama pada pemodelan data magnetotelurik menjadi model inversi terdiri dari resistivitas semu, fase, dan efek statik. Resistivitas semu dan fase sebagai komponen dasar yang digunakan dalam analisa data magnetotelurik secara kualitatif dan kuantitatif. Secara kualitatif ditinjau pada pola distribusi nilai tahanan jenis semu terhadap frekuensi begitu juga pada fase magnetotelurik. Sedangkan secara kuantitatif ditinjau dari besaran nilai pada kurva XY dan YX yang mewakili nilai resistivitas sekaligus fase. Namun informasi tersebut belum cukup untuk menjadi acuan dalam interpretasi bawah permukaan bumi, sehingga perlu tahapan – tahapan pengolahan data hingga diperoleh model bawah permukaan yang mendekati informasi struktur lapisan bumi.

Tahapan tersebut meliputi koreksi efek statik dan parameterisasi inversi. Pada tahapan koreksi efek statik berfungsi untuk mengurangi efek statik pada kedua kurva tersebut. Efek tersebut membuat kedua kurva saling menjauh padahal kondisi ideal kurva tersebut saling berhimpit, akibatnya akan menimbulkan kerancuan informasi dikarenakan efek statik. Setelah dilakukan koreksi langkah selanjutnya melakukan parameterisasi inversi yang menggunakan inversi *non linear conjugate gradient* . Hasil yang didapatkan berupa model bawah permukaan bumi secara dua dimensi. kemudian *dicrosscheck* dengan informasi geologi. Berdasarkan ulasan singkat tersebut, penelitian ini membahas tentang resistivitas semu dan fase beserta hubungan kedua parameter tersebut, pengaruh efek statik pada data magnetotelurik, pemodelan inversi secara 2 dimensi hingga intepretasi daerah penelitian.

6.1 Resistivitas Semu Magnetotelurik

Nilai resistivitas semu pada data magnetotelurik mengindikasikan persebaran nilai resistivitas secara lateral maupun terhadap kedalaman. Nilai tersebut tidak menunjukkan nilai *resistivitas* yang sebenarnya namun menunjukkan pola persebaran *resistivitas semu* sebagai respon dari perambatan gelombang elektromagnetik dibawah permukaan bumi. Distribusi nilai resistivitas semu disajikan dalam bentuk kurva *non linear* yang menampilkan perubahan nilai resistivitas semu terhadap frekuensi alami gelombang elektromagnetik bumi. Kurva tersebut ditampilkan menjadi dua jenis yaitu kurva XY dan YX. Kedua kurva ini terlihat sama secara kasat mata namun memiliki makna yang berbeda. Pada kurva XY menyajikan distribusi nilai resistivitas semu yang menggunakan teori *transverse electric (TE)* sedangkan kurva YX seperti kurva sebelumnya tetapi menggunakan teori *transverse magnetic (TM)*. TE dan TM sebagai teori yang menafsirkan informasi pengukuran magnetotelurik melalui persamaan matematis dan fisis hingga didapatkan kurva resistivitas semu terhadap frekuensi. Berdasarkan teori tersebut kurva XY menampilkan informasi persebaran nilai resistivitas semu

secara vertikal kebawah permukaan bumi dan YX menampilkan persebaran nilai resistivitas semu secara lateral dilapisan bumi seperti pada gambar 5.1



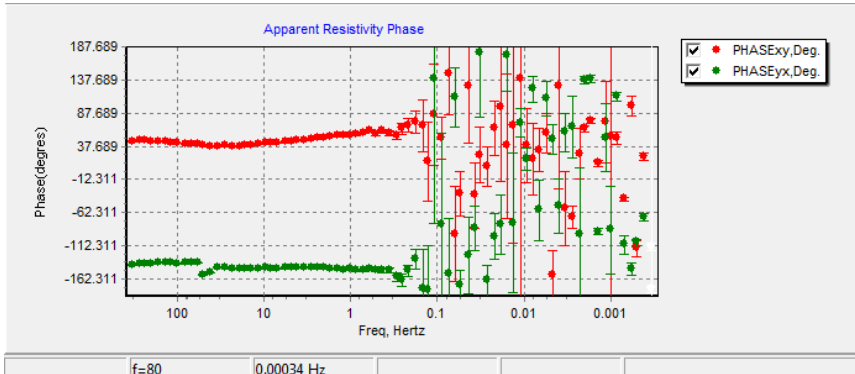
Gambar 5. 1 Kurva *rho apparent* data MTLL-16A

Kurva XY berwarna merah dan YX berwarna hijau memiliki pola yang hampir mirip dikarenakan memiliki kecenderungan nilai resistivitas semu yang bertambah terhadap nilai frekuensi yang terukur. Dari gambar tersebut dapat diperoleh informasi bahwa ada indikasi respon struktur lapisan batuan penundung dan *heat source*. Respon batuan penundung dapat dilihat pada nilai resistivitas kedua kurva yang sangat rendah yaitu dibawah 100 ohm-m pada frekuensi 320 hz – 100 hz sedangkan lapisan *heat source* terdapat pada frekuensi rentang 0,1-0,01 hz yang ditunjukkan respon naiknya nilai resistivitas semua secara ekstrim sampai mendekati nilai 10.000 ohm-m.

Selain itu pada data MTLL-16 A terdapat bentuk kurva yang saling memotong. Kurva XY mengalami kenaikan begitu besar dan berkelanjutan pada rentang frekuensi 10 – 0,001. Ditambah lagi kurva XY memotong kurva YX pada rentang frekuensi 10 - 1 hz. Hal tersebut diduga sebagai struktur reservoir panas bumi yang memiliki beda karakteristik resistivitas semu diantara dua lapisan sebelumnya. Sebab pada awalnya pola distribusi resistivitas semu XY dan YX di frekuensi 320-10 hz mengindikasikan sebagai respon batuan penundung, namun mengalami perubahan direntang 10 – 1hz dan mengalami pertambahan nilai yang tinggi sekaligus berkelanjutan dibawah 1 hz sebagai respon dari lapisan *heat source*. Sehingga perubahan nilai tersebut diduga sebagai bentuk perlapisan batuan didalam bumi. Namun kurva XY dan YX menampilkan informasi tentang nilai resistivitas semu yang dapat dimungkinkan nilai tersebut masih dipengaruhi oleh efek statik. Oleh sebab itu analisa pola kurva resistivitas semu sebatas analisa kualitatif tentang jumlah lapisan bumi yang terukur oleh metode magnetotelurik.

6.2 Fase Magnetotelurik

Fase magnetotelurik yang mengalami distorsi pada frekuensi rendah diindikasikan sebagai respon *noise* yang terjadi saat pengukuran seperti pada gambar 5.2 tersebut.



Gambar 5. 2 Kurva fase data MTLL-16A

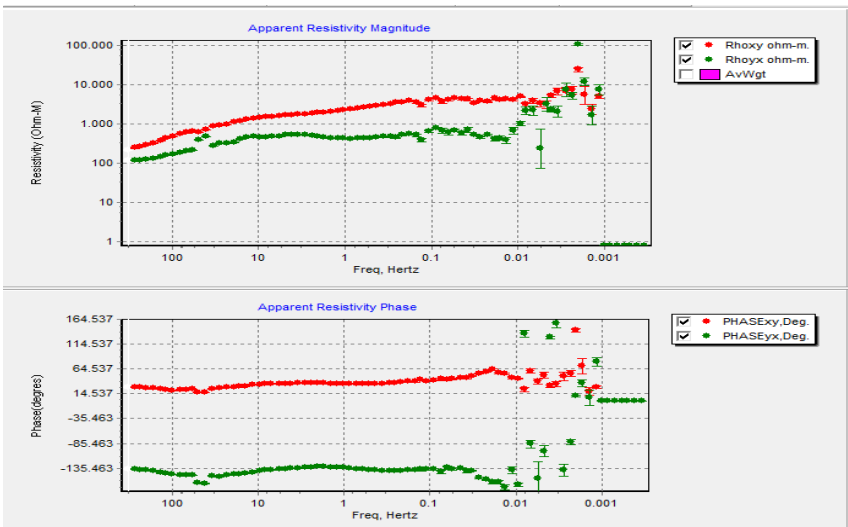
Meskipun mengalami kerusakan pola pada frekuensi rendah, tetapi masih terdapat pola samar yang menunjukkan kenaikan derajat fase. Fase yang mengalami kenaikan derajat pada frekuensi 0,1 hz seperti pada gambar tersebut diduga sebagai lapisan bumi yang letaknya relatif dalam dari permukaan bumi.. Tapi perubahan tersebut mungkin merupakan respon dari fluktuasi muatan gelombang elektromagnetik yang disebabkan oleh peristiwa badai matahari atau sambaran petir. Selain itu kurva fase menunjukkan pola arah derajat perambatan gelombang EM secara lateral dan terhadap kedalaman. Fase XY menunjukkan arah derajat gelombang EM vertikal kebawah dan YX menunjukkan respon terhadap arah horizontal lapisan bumi. Kedua kurva memiliki pola yang hampir mirip dikarenakan gelombang elektrik dan magnetik merambat didalam bumi secara berpotongan sehingga terdapat terjadi kemiripan pola.

Fase yang mengalami perubahan pola seperti turun atau naik nilai derajatnya diduga sebagai batas antar lapisan. Gambar 5.2 terdapat indikasi batas lapisan bumi pada kurva XY dan YX. Kurva XY diasumsikan terjadi perubahan lapisan bumi kebawah serta terdapat tiga perubahan lapisan pada rentang frekuensi 320 – 100 , 100 – 10, dan 10 – 0,1 . Sedangkan pada kurva YX diduga terdapat kontak antar struktur secara horizontal berupa batas antarlapisan yang berjumlah tiga lapisan. Namun informasi perubahan derajat fase sebatas pendugaan secara kualitatif sehingga dimungkinkan terjadi kesalahan penafsiran informasi. Agar lebih detil maka data tersebut diolah pada

tahap pemodelan inversi 2 dimensi dengan melakukan parameterisasi proses inversi.

6.3 Hubungan Resistivitas Semu dan Fase Magnetotelurik

Persebaran nilai resistivitas semu dan fase magnetotelurik saling berkaitan. Begitu juga bentuk pola naik atau turunnya kurva XY dan YX yang menampilkan persebaran nilai tersebut. Pola seperti itu dapat menampilkan jumlah lapisan bumi bila ditinjau dari perubahan nilai resistivitas semu. Selain menampilkan jumlah lapisan, fase menampilkan respon perubahan nilai resistivitas, seperti pada gambar 5.3 dibawah ini.



Gambar 5. 3 Kurva resistivitas semu dan fase pada data MTL-22

Ditinjau dari fase magnetotelurik, fase yang mengalami kenaikan derajat pada frekuensi 10-0,1 hz seperti gambar 5.3 akan mengakibatkan nilai resistivitas semu cenderung naik. Berdasarkan hal tersebut dapat diketahui bahwa perubahan nilai resistivitas semu akan berdampak pada besar atau kecil derajat fase. Semakin tinggi dan rendah nilai resistivitasnya maka respon fasenya akan menampilkan perubahan nilai yang mencolok. Hal itu disebabkan karena secara fisis gelombang elektromagnetik akan mengalami pelemahan energi jika menembus lapisan bumi. Pelemahan energi tersebut disajikan berupa perubahan nilai fase yang mengalami kenaikan ataupun penurunan pada kurva XY dan YX. Pada gambar tersebut terdapat fase yang pada mulanya mengalami penurunan dari frekuensi 320 – 100 hz, kemudian mulai naik kembali dari rentang frekuensi kurang dari 100 – 0,01 hz. Fase yang menurun disebabkan

karena nilai resistivitas mulai bertambah dari nilai dibawah 100 ohm menjadi 1000 ohm pada frekuensi yang sama. Kemudian terus bertambah nilai resistivitasnya hingga menjadi 10.000 ohm pada frekuensi dibawah 0,01 hz yang mengakibatkan perubahan fase yang sebelumnya menurun kembali naik mengikuti pola sebaran nilai resistivitasnya. Naik dan turun pada fase ataupun resistivitasnya mengindikasikan gelombang elektromagnetik menembus lapisan bumi yang begitu kompleks secara lateral maupun vertical sehingga memberi respon berupa besaran derajat gelombang tersebut dalam bentuk fase dan nilai resistivitas sebagai produk dari polarisasi gelombang elektromagnetik terhadap struktur lapisan bumi.

6.4 Efek Statik Pada Data Magnetotelurik

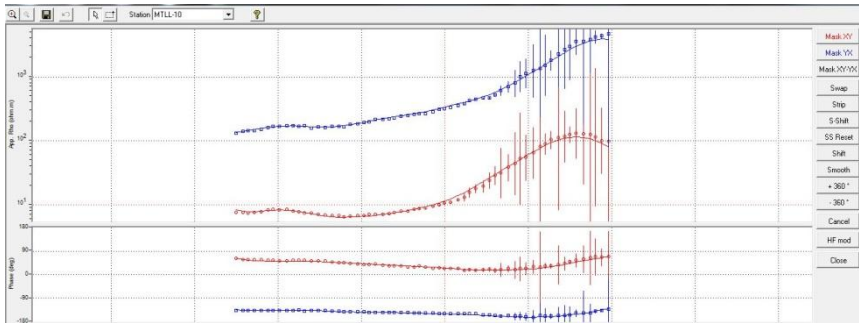
Kondisi ideal pada data magnetotelurik adalah kurva resistivitas semu XY dan YX saling berhimpit dan pada fasenya memiliki pola derajat yang hampir mirip. Tetapi data yang diperoleh dari pengukuran magnetotelurik menampilkan kedua kurva saling menjauh. Penyebab dari hal tersebut adalah efek statik. Pada dasarnya efek statik merupakan fenomena alami yang ditemukan pada data pengukuran magnetotelurik. Efek tersebut membuat kurva XY dan YX mengalami *shifting* yang mengakibatkan distribusi nilai resistivitasnya kurang akurat. Solusi untuk meminimalkan efek statik dengan melakukan metode koreksi statik. Metode ini menggunakan hasil pengukuran data TDEM (Time Domain Elektromagnetik) yang memberikan informasi nilai resistivitas semu yang lebih akurat. Namun tidak semua koreksi statik menggunakan hasil pengukuran tersebut, ada juga menggunakan persamaan matematis dalam solusi dari efek statik seperti pada penelitian ini.

. Koreksi efek statik yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan persamaan matematis median. Koreksi ini dilakukan dengan cara mencari nilai tengah dari kurva resistivitas semu XY dan YX pada frekuensi yang sama dengan asumsi bahwa daerah penelitian memiliki struktur lapisan yang dianggap homogen. Setelah itu kedua kurva digeserkan menuju nilai koreksi yang diperoleh. Pada penelitian ini menggunakan nilai frekuensi sebesar 100 hz sebagai acuan menggeser kedua kurva. Hal ini berdasarkan informasi kedalaman penetrasi maksimal gelombang elektromagnetik buatan dari metode TDEM yang kemudian dikonversi menjadi nilai frekuensi. Sehingga diperoleh hasil koreksi efek statik pada tabel 5.1 dihalaman selanjutnya.

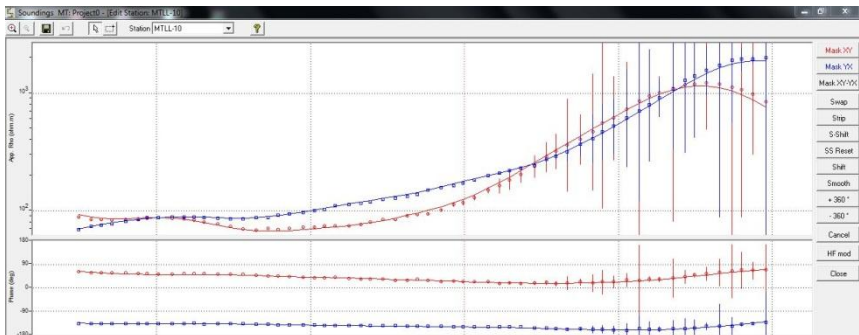
Tabel 5. 1 Koreksi efek static menggunakan nilai median pada fekuensi 100 hz

NO	Stasiun	XY	YX	MEDIAN
1	MTLL-03	Berimpit	berimpit	Berimpit
2	MTLL-09A	61,8	1	31,4
3	MTLL-10	8	179	93,5
4	MTLL-16A	22	43,5	32,75
5	MTLL-17	55	121,3	88,15
6	MTLL-22	149	513	331
7	MTLL-23	36	30	33
8	MTLL-31	52,4	24,5	38,45
9	MTLL-02	21	81	51
10	MTLL-09	17,5	157,5	87,5
11	MTLL-16	60	20	40
12	MTLL-22	111	55	83
13	MTLL-30	80	66	73
14	MTLL-4A	61	39	50
15	MTLL-11	44,5	19,3	31,9
16	MTLL-17A	45,2	52,1	48,65
17	MTLL-18	45,5	105,5	75,5
18	MTLL-24	106,5	21,5	64
19	MTLL-32	15,5	56,5	36

Berdasarkan koreksi tersebut, semua kurva XY dan YX pada masing – masing data magnetotelurik digeser sesuai dengan nilai median tersebut. Berikut ini adalah hasil sebelum dikoreksi dan setelah dikoreksi pada gambar dihalaman selanjutnya.

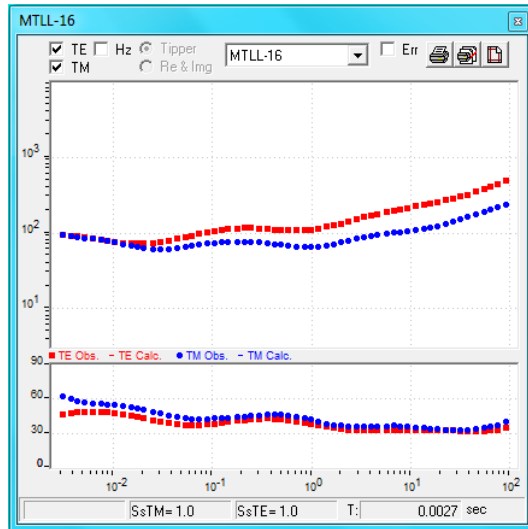


Gambar 5. 4 Data MTLL-10 sebelum dikoreksi efek statik



Gambar 5. 5 Data MTLL-10 setelah dikoreksi efek statik

Setelah dikoreksi terlihat kurva XY yang berwarna merah dan YX yang berwarna biru saling berhimpit pada frekuensi 100 dan secara keseluruhan persebaran nilai resistivitasnya meningkat terhadap frekuensi yang terukur. Hal itu dapat diduga bahwa terdapat potensi *heat source* pada frekuensi terkecil atau bisa jadi respon batuan yang kompak. Akan tetapi terdapat kekurangan pada data MTLL-10 berupa ditemukan *error bar* (garis vertikal merah) pada frekuensi rentang 1 – 0,01 hz yang relatif banyak. *Error* tersebut mengakibatkan keambiguan nilai resistivitas pada frekuensi rendah. Sehingga dapat terjadi kesalahan pada penafsiran nilai resistivitasnya. Agar lebih detil penafsiran informasi tersebut maka perlu menggunakan metode inversi.



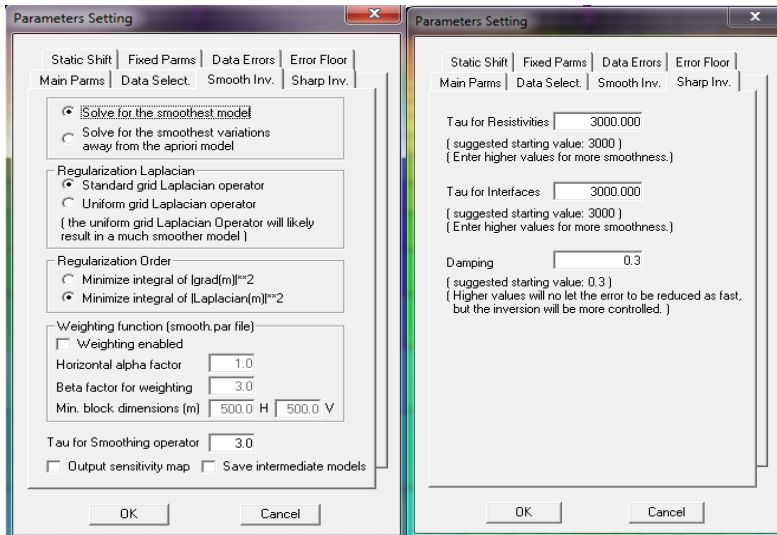
Gambar 5. 7 Data observasi magnetotelurik MTLL-16, kurva merah adalah XY(TE) dan biru adalah YX(TM)

Gambar *forward model* dihalaman sebelumnya menggunakan nilai resistivitas semu sebesar 50 ohm. Penentuan parameter nilai resistivitas forward model berdasarkan asumsi bahwa bumi bersifat menyerap gelombang elektromagnetik (EM). Lapisan yang bernilai resistivitas rendah akan mengakibatkan proses perambatan gelombang EM mengalami antenuasi lebih besar, sehingga penjarannya tidak mampu menembus bumi lebih dalam. Fenomena tersebut menjadi nilai kedalaman semu (*skindepth*) yang diperkirakan pada forward model. Semakin rendah inisial nilai resistivitasnya maka resolusi pemodelan semakin detil namun kedalaman yang diperoleh semakin dangkal, sedangkan bila semakin besar nilai resistivitasnya maka hasil pemodelan semakin bias dan ambigu tetapi kedalamannya semakin dalam. Berdasarkan inisial resistivitas yang digunakan pada forward ini diperkirakan kedalaman semu maksimal yang diperoleh rentang 4000-35000 meter berdasarkan persamaan matematis *skindepth*. Namun dalam pemodelan inversi ini di cut-off sampai kedalaman 4000 meter disebabkan resolusi MT yang semakin tidak jelas pada lapisan yang lebih dalam 4000 meter. Selain itu terlalu mengambil resiko bila pemodelan diteruskan sampai 35000 meter, sebab pada dasarnya sistem panas bumi mayoritas kedalaman yang ditemukan tidak lebih dari 4000 meter.

Selanjutnya gambar 5.7 sebagai contoh data observasi dapat terlihat bahwa kurva XY dan YX diganti menjadi kurva TE dan TM. Kurva tersebut pada dasarnya sama seperti dua kurva sebelumnya namun sangat berbeda pada

pemodelan inversi ini. Kedua kurva tersebut akan merepresentasikan sebaran nilai resistivitas sebenarnya secara lateral dan vertikal didalam lapisan bumi. Proses inversi 2 dimensi akan melibatkan kurva TE dan TM dalam analisa dimensionalitas bawah permukaan bumi. Secara fisis kurva TE diasumsikan dari perubahan degradasi nilai polarisasi medan magnet secara vertikal didalam bumi. Fenomena degradasi nilai tersebut disebabkan oleh efek antenuasi gelombang karena itu nilai disetiap lapisan berbeda beda. Respon dari polarisasi tersebut ditampilkan dalam nilai resistivitas dan fase pada TE, pada gambar 5.7 . Begitu juga pada TM yang secara fisis merupakan perubahan nilai polarisasi medan listrik didalam bumi yang ditampilkan dalam bentuk kurva TM.

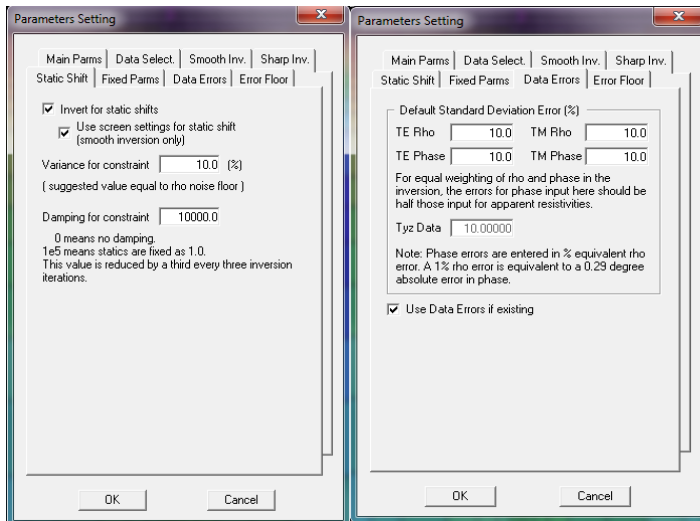
Algoritma inversi yang diterapkan adalah algoritma *non linear conjugate gradient*. Algoritma ini menggunakan persamaan diferensial pada fungsi minimum yang tujuannya untuk meminumkan pengaruh *outliyer* hingga diperoleh solusi optimum. Parameter yang digunakan dalam fungsi minimum adalah nilai *Tau* dan faktor pengali langrange. Fungsi minimum diperoleh dari kombinasi nilai *tau* dan *lagrange* yaitu nilai tau sebesar 3,0 dan lagrange sebesar 0,3 yang dilakukan pada penelitian ini seperti pada gambar parameterisasi inversi dibawah ini.



Gambar 5. 8 Parameter inversi 2-D menggunakan nilai tau(kanan) dan lagrange(kiri)

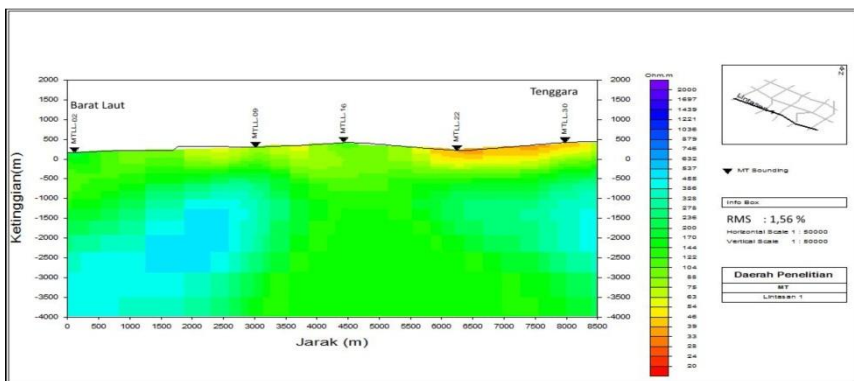
Selanjutnya parameter lain yang digunakan pada proses inversi ini adalah *static shift*, *error flor*, dan *data error*. Parameter *static shift* digunakan untuk mengaktifkan koreksi efek statik selama proses inversi berlangsung,

kemudian error floor dan data error merupakan batasan nilai rms yang digunakan pada proses inversi. Idealnya ketiga parameter tersebut memiliki nilai yang mirip dengan parameter *smoothing data* pada bab 4. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini menggunakan nilai sebesar 10 % untuk semua parameternya seperti pada gambar dibawah 5.9. Nilai tersebut akan membatasai nilai rms tidak lebih dari 10 % bahkan bisa mengoptimalkan pemodelan inversi hingga memiliki rms dibawah 5 %, sebab pemodelan yang ideal pada data MT memiliki rms yang nilainya dibawah 5 %.

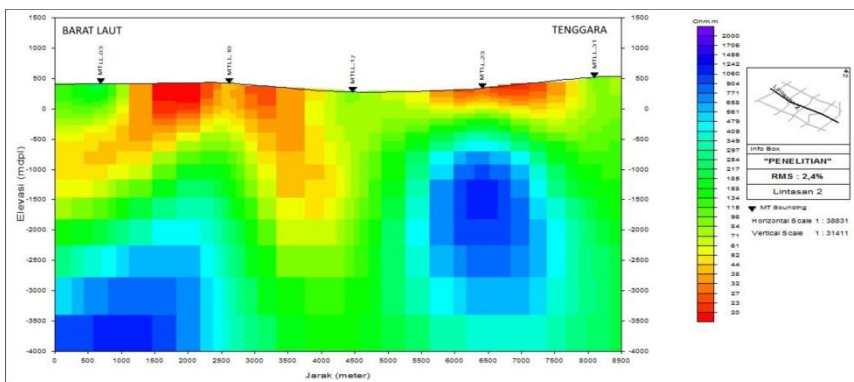


Gambar 5. 9 Parameter *static shift*, *error floor*, dan *data error*

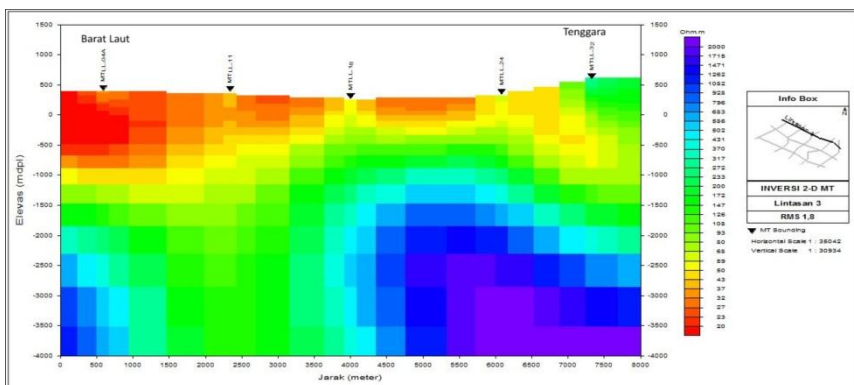
Berikutnya inversi data magnetotelurik menggunakan gabungan inversi *mode* TE dan TM. Bila menggunakan TE *mode* akan diperoleh bentuk model inversi yang detil kearah kedalaman lapisan bumi tetapi kurang detil secara horizontal di lapisan bumi. Inversi ini digunakan bila data magnetotelurik bersumber dari pengukuran pada satu zona struktur saja. Jika ada struktur lain maka terjadi diskontinuitas pemodelan yang diakibatkan TE *mode* memiliki kelemahan dalam inversi MT secara lateral. Sedangkan TM merupakan kebalikan dari TE, secara horizontal sangat detil memetakan lapisan permukaan bumi namun jika ditinjau dari kedalaman maka hasil model inversinya sangat ambigu. Oleh sebab itu pada penelitian ini, solusi inversi yang digunakan adalah inversi TE dan TM yang bertujuan untuk mendapatkan hasil inversi yang optimum secara horizontal maupun vertikal. Hasil pemodelan inversi dapat dilihat pada gambar - gambar pemodelan inversi dibawah ini.



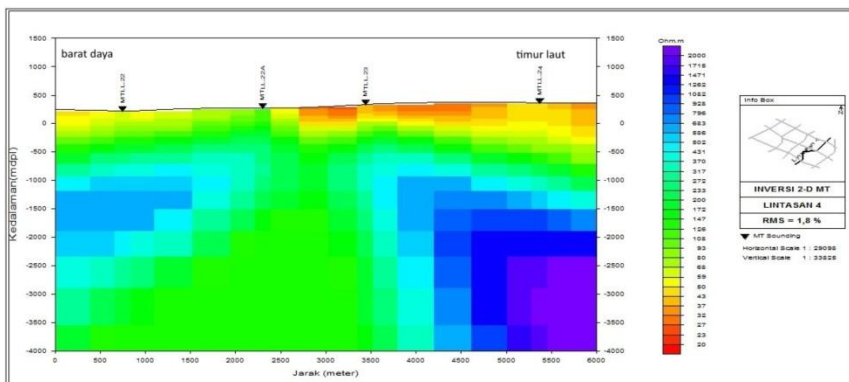
Gambar 5. 10 Inversi 2-D MT Lintasan 1



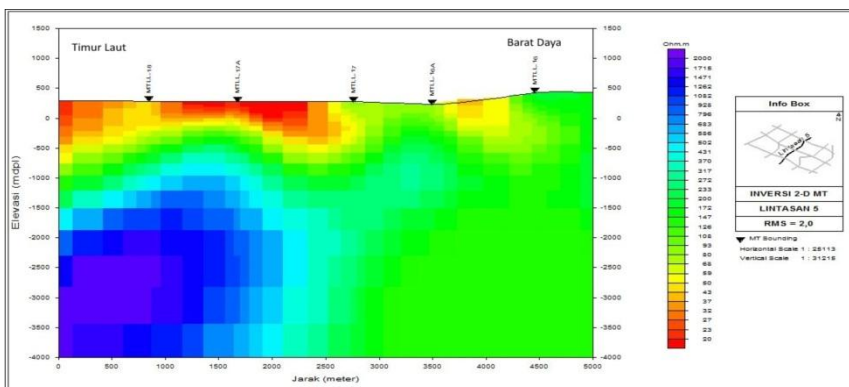
Gambar 5. 11 Inversi 2-D MT Lintasan 2



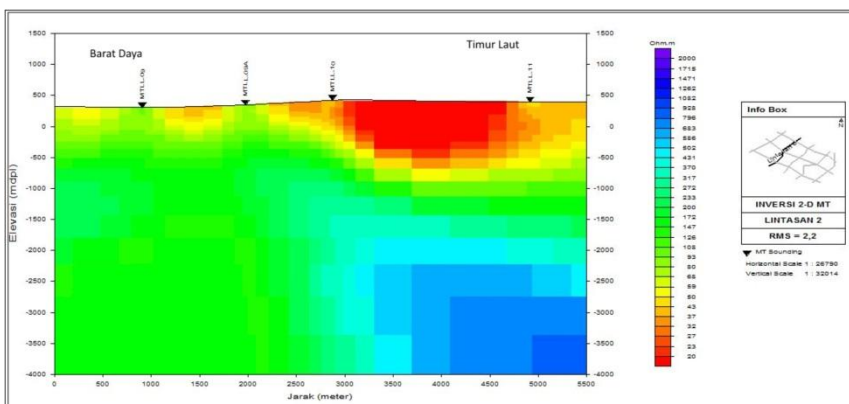
Gambar 5. 12 Inversi 2-D MT Lintasan 3



Gambar 5. 13 Inversi 2-D MT Lintasan 4



Gambar 5. 14 Inversi 2-D MT Lintasan 5



Gambar 5. 15 Inversi 2-D MT Lintasan 6

Hasil pemodelan inversi dua secara dimensi pada lintasan satu sampai dengan tiga memiliki arah lintasan barat laut menuju tenggara. Rentang nilai resistivitas sebenarnya sebesar 20 – 2000 ohm meter pada pemodelan ketiga lintasan tersebut. Nilai resistivitas dibawah 100 ohm meter diindikasikan sebagai anomali resistivitas rendah. Lalu rentang nilai 100 – 250 ohm meter sebagai anomali resistivitas menengah. Kemudian nilai diatas 250 ohm meter sebagai anomali resistivitas tinggi. Anomali nilai rendah diduga sebagai respon medium konduktif dan nilai tinggi sebagai respon medium resistif sedangkan nilai menengah diduga sebagai medium transisi antara konduktif dan resistif. Lintasan satu, dua, dan tiga secara kualitatif terdapat respon medium konduktif, resistif, dan medium transisi. Nilai RMS pada lintasan satu sebesar 1,56 %, lintasan dua sebesar 2,4 %, dan lintasan tiga sebesar 1,8 %.

Adapun hasil pemodelan inversi dua dimensi pada lintasan empat, lima, dan enam memiliki arah lintasan timur laut menuju barat daya. Arah lintasan tersebut memotong titik tengah antara lintasan satu sampai dengan tiga dengan rentang nilai resistivitas sama dengan tiga lintasan sebelumnya. Ketiga lintasan ini juga ditemukan kontras anomali rendah, sedang, dan tinggi nilai resistivitas model inversinya dengan rentang nilai yang sama dengan ketiga lintasan sebelumnya. Anomali – anomali yang ditemukan diduga sebagai respon dari medium konduktif, transisi, dan resistif secara kualitatif ditinjau pada hasil masing – masing lintasan. Kemudian nilai rms pada masing – masing lintasan sebesar 1,8 % untuk lintasan empat, 2 % untuk lintasan lima, dan 2,2 % untuk lintasan enam. Tahap selanjutnya seluruh hasil lintasan diinterpretasikan secara kuantitatif dan kualitatif pada sub bab bahasan 5.6.

6.6 Interpretasi Model Inversi 2-D MT

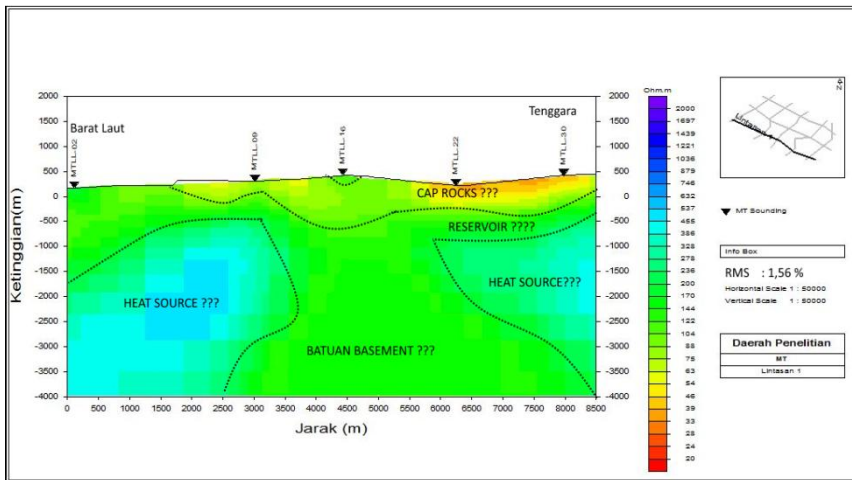
Berdasarkan informasi geologi lapangan panas bumi terbentuk dari aktifitas sesar geser yang menciptakan gawir sesar yang berbentuk setengah radial dan menimbulkan zona depresi disebabkan oleh patahan yang ditimbulkan dari aktivitas sesar geser. *Heat source* diperkirakan dari sisa panas dapur magma yang berasosiasi dengan aktivitas plutonik muda berumur kuartar. Kemudian fluida yang meresap kedalam bumi berasal dari zona resapan di daerah struktur Vulkanik Walimbong. Fluida tersebut mengalami konveksi didalam bumi dan muncul kembali sebagai mata air panas didekat stasiun pengukuran magnetotelurik MTLL 16-A. Fluida yang muncul tersebut mengalami kontak dengan batuan sekitar mata air panas sehingga mengalami perubahan sifat fisika dan kimia pada batuan tersebut menjadi mineral baru berupa alterasi batuan yang dominan endapan mineral silika atau sinter silika. Batuan disekitar mata air panas memiliki sifat kedap air dengan kandungan mineral silika cukup tinggi, sehingga diinterpretasikan sebagai batuan penutup yang mengalami proses alterasi fluida hidrotermal.

Sedangkan bila ditinjau dari metode magnetotelurik (MT) terdapat indikasi dari lapisan *cap rock*, reservoir, *heat source*, patahan, alterasi batuan dan kontak antar struktur. Indikasi tersebut ditinjau secara kualitatif dan kuantitatif berdasarkan rentang nilai resistivitas sebenarnya terhadap kedalaman model. Pada model hasil inversi 2-D MT menggunakan rentang nilai resistivitas minimal sebesar 20 ohm dan maksimal sebesar 2000 ohm. Berdasarkan korelasi nilai resistivitas model dengan tabel resistivitas batuan menurut Palacky (1987) menunjukkan rentang nilai 20 – 50 ohm diduga sebagai respon dari lapisan *cap rock*, diatas 50 ohm sampai 250 ohm diduga sebagai respon lapisan reservoir fluida hidrotermal dan diatas 250 ohm sampai 2000 ohm sebagai lapisan *heat source*. Sedangkan berdasarkan pemodelan inversi terdapat rentang nilai resistivitas menengah antara 50-100 ohm didaerah alterasi batuan yang berdekatan titik ukur MTLL-16A. Indikasi patahan dan kontak antarstruktur batuan ditinjau dari kontras resistivitas. Pada patahan terdapat kontras resistivitas yang berbentuk vertikal kebawah sedangkan kontak struktur memiliki kontras resistivitas yang berpola unik. Semua indikasi tersebut menjadi acuan dalam interpretasi bawah permukaan bumi berdasarkan pemodelan MT untuk semua lintasan yang dimodelkan.

Adapun pada pemodelan inversi lintasan satu ditemukan dugaan lapisan *cap rock* yang berdekatan dengan permukaan bumi serta memiliki ketebalan kurang lebih 100 hingga 500 meter dibawah permukaan bumi. Lapisan ini menebal mencapai 500 meter dari arah barat daya (MTLL-09) menuju tenggara (MTLL-30) dengan sebaran nilai resistivitas berkisar 20 – 50 ohm meter. Lapisan penudung diinterpretasikan sebagai produk pelapukan batuan – batuan vulkanik tak terpisahkan yang meliputi lava berkomposisi andesitik hingga basaltik ditinjau dari kombinasi hasil inversi MT dan informasi geologi. Kemudian dibawah lapisan *cap rock* diperkirakan sebagai lapisan reservoir fluida hidrotermal dengan distribusi nilai resistivitas rentang 100-250 ohm meter. Lapisan tersebut menebal dari 100 hingga 500 meter dari arah tenggara menuju barat laut diperkirakan lapisan tersebut sebagai lapisan andesit porifiri berdasarkan kombinasi sayatan geologi dan model inversi MT. Adapun lapisan *heat source* diduga terletak dibawah lapisan reservoir. Lapisan *heat source* memiliki ketebalan mencapai lebih dari 4000 meter yang terletak pada kedalaman dibawah 1000 meter dari permukaan bumi. Lapisan tersebut diprediksi sebagai kubah magma yang menerobos struktur formasi walimbong dan terakumulasi didekat lapisan andesit porifiri dengan indikasi resistivitas lebih dari 250 ohm meter.

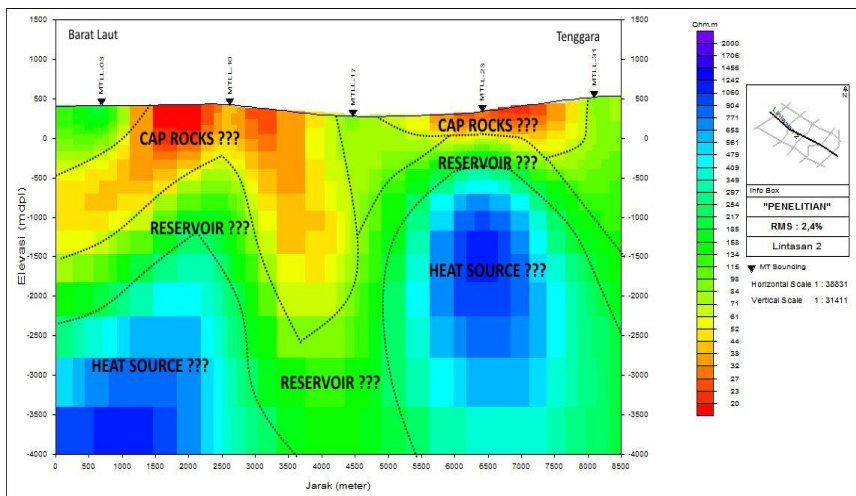
Selanjutnya dibawah titik ukur MTLL-16 terdapat kontras resistivitas yang berbentuk vertikal yang diduga sebagai lapisan batuan induk yang tidak mengalami proses instruksi magma. Batuan induk tersebut diinterpretasikan sebagai formasi vulkanik walimbog. Selain itu bila ditinjau secara fisis pada lapisan tersebut maka fenomena diskontinuitas resistivitas disebabkan oleh

struktur yang kompleks dibawah permukaan bumi seperti indikasi instruksi sehingga menyebabkan pemodelan seperti pada gambar 5.16 .



Gambar 5. 16 Interpretasi MT lintasan 1

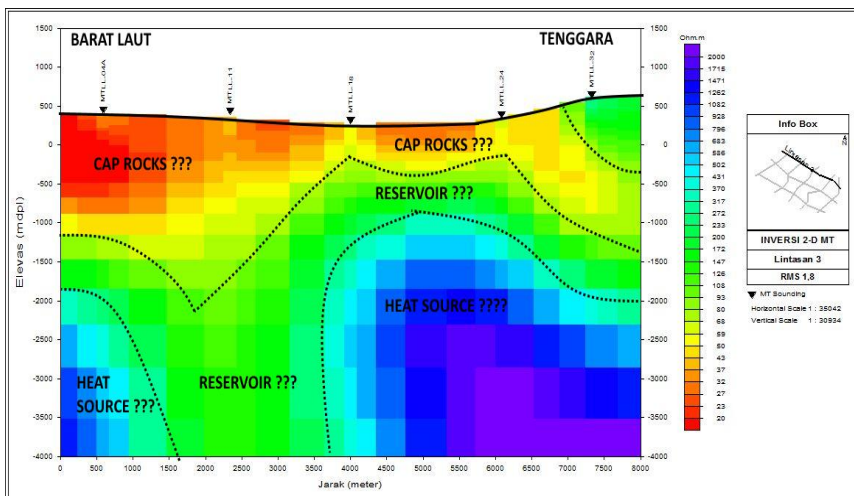
Selanjutnya lintasan dua terdapat kontras resistivitas secara vertikal kebawah lapisan bumi yang berada dibawah titik ukur MTLL – 17. Kontras tersebut diduga sebagai patahan yang disebabkan oleh sesar geser. Patahan tersebut membuat lapisan yang bernilai resistivitas rendah mengalami diskontinuitas pada sebaran nilai resistivitasnya. Lapisan tersebut memiliki ketebalan yang relatif tebal dari 500 sampai 2500 meter dan menebal dari arah tenggara menuju barat laut. Selain itu terdapat distribusi nilai anomali resistivitas rendah dengan rentang nilai 20 – 50 ohm meter sehingga diperkirakan sebagai lapisan *cap rock*. Dibawah lapisan penudung terdapat lapisan reservoir yang tertekan. Lapisan tersebut diperkirakan dari rentang nilai resistivitas sedang antara 100 – 250 ohm meter. Selain itu lapisan ini diduga tertekan kebawah oleh lapisan penudung yang sangat tebal didaerah titik pengukuran MTLL 3, 10, dan 17. Lapisan *heat source* diperkirakan dibawah lapisan reservoir dengan ketebalan bervariasi dari 500 sampai dengan 2000 meter lebih. Tetapi lapisan tersebut tersebut mengalami diskontinuitas juga karena ada patahan dibawah MTLL-17 sehingga menyebabkan persebaran *heat source* terputus pada lapisan tersebut. Rentang nilai resistivitasnya lebih dari 250 ohm meter dan diindikasikan sebagai respon *heat source* plutonik, seperti pada gambar 5.17 dihalaman selanjutnya.



Gambar 5. 17 Interpretasi MT lintasan 2

Hasil pemodelan bila dikorelasikan dengan informasi sayatan geologi maka lapisan penudung diinterpretasikan sebagai produk pelapukan batuan vulkanik tak terpisahkan yang tersusun dari lava andesitik hingga basaltic. Proses pelapukan tersebut membuat satuan batuan tersebut menjadi lebih impermeabel. Akibatnya fluida di lapisan reservoir tidak bisa menembus lapisan tersebut. Lapisan reservoir diinterpretasikan sebagai lapisan andesit porifiri berdasarkan sayatan geologi. Lapisan ini ditekan oleh lapisan *cap rock* di atasnya dan ditambah aktivitas sesar hingga menyebabkan lapisan reservoir mengalami pembelokan kebawah. Dibawah lapisan reservoir terdapat intrusi magma yang menerobos batuan induk. Akibat dari terobosan ini mengakibatkan fluida di dalam reservoir mengalami konveksi, namun pada model lintasan 2 tidak ditemukan manifestasi panas bumi seperti mata air panas meskipun terdapat lapisan yang diperkirakan patahan. Sebab bila terdapat zona patahan maka akan memudahkan fluida menerobos yang dikarenakan zona tersebut merupakan titik lemah dari lapisan bumi.

Berikutnya lintasan tiga memiliki kemiripan dengan lintasan satu dan dua dimana terdapat diskontinuitas lapisan yang diduga sebagai patahan di dalam lapisan tersebut, seperti pada gambar 5. 18.



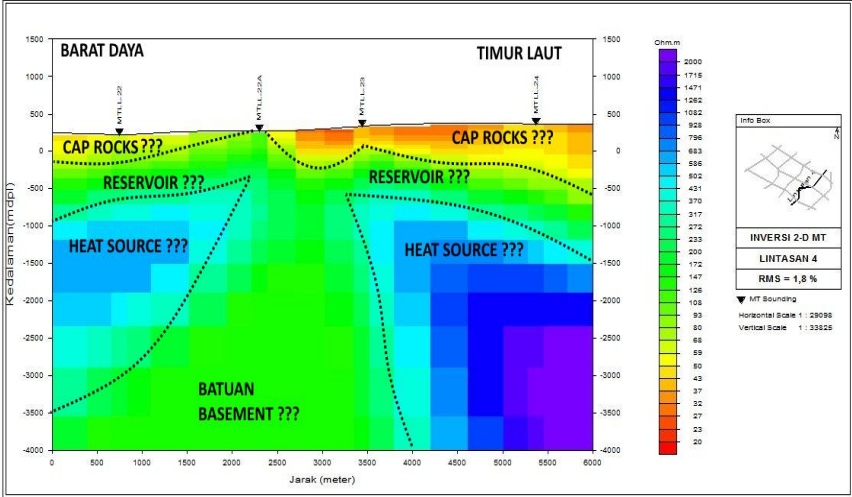
Gambar 5. 18 Interpretasi MT lintasan 3

Anomali resistivitas rendah pada lintasan tiga memiliki kemiripan dengan lintasan dua dimana sebaran resistivitas tersebut menebal dari arah tenggara menuju barat laut. Nilai resistivitas tersebut memiliki rentang nilai 20 – 50 ohm meter. Sebaran tersebut diduga sebagai lapisan *cap rock*. Kemudian dibawah lapisan tersebut terdapat anomali resistivitas menengah dengan rentang nilai 100 – 250 ohm meter. Anomali tersebut diperkirakan sebagai lapisan reservoir fluida hidrotermal. Lapisan ini ditekan oleh lapisan *cap rock* yang sangat tebal dari arah barat laut yang mengakibatkan lapisan reservoir melengkung kedalam dengan kedalaman lebih dari 4000 meter. Lapisan yang dibawah reservoir memiliki nilai resistivitas yang besar dengan nilai lebih dari 250 ohm meter. Hal ini mengindikasikan sebagai sebaran *heat source* dibawah permukaan bumi yang memiliki ketebalan yang bervariasi.. Informasi dari pemodelan lintasan tiga dikorelasikan dengan sayatan geologi hingga didapatkan interpretasi pada lapisan penudung, reservoir, *heat source*. Lapisan penudung diduga sebagai respon dari satuan batuan vulkanik tak terpisahkan yang terdiri dari lava poriviri hingga andesitik. Lapisan reservoir diprediksi sebagai lapisan andesit porifiri dan *heat source* diindikasikan sebagai intrusi magma yang menembus lapisan batuan induk. Batuan itu diduga formasi vulkanik walimbong.

Lintasan satu, dua, dan tiga tidak memotong manifestasi *heat source* akan tetapi pola sebaran resistivitas memiliki kemiripan. Pola yang mirip ditemukan terdapat kontras resistivitas yang diperkirakan sebagai patahan ataupun kontak antarlapisan. Akibat dari kontras tersebut menyebabkan distribusi resistivitas terputus pada zona tersebut. Hal ini menjadi studi kasus yang menarik dimana ditemukan fenomena diskontinuitas lapisan. Fenomena

tersebut secara fisis disebabkan karena gelombang elektromagnetik yang merambat didalam bumi akan mengalami akumulasi muatan pada batas antarlapisan yang memiliki nilai konduktifitas batuan yang berbeda jauh. Akibatnya perambatan gelombang elektromagnetik tidak merata didalam bumi, namun masih terdapat kemungkinan dapat menembus lapisan yang beda konduktivitas meskipun sangat kecil.

Adapun hasil pemodelan lintasan empat, lima dan enam berarah timur laut – barat daya dengan lintasan lima memotong mata air panas daerah “Penelitian”. Mata air panas berdekatan dengan titik ukur MTLL-16A pada lintasan lima. Ketiga lintasan tersebut memotong tiga formasi satuan yang terdiri dari batuan vulkanik walimbong, andesit porifiri, dan vulkanik tak terpisahkan berdasarkan informasi geologi. Rentang nilai resistivitas yang dimodelkan dari 20 – 2000 ohm meter dengan kedalaman maksimal model sebesar 4000 meter. Hasil pemodelan inversi ketiga lintasan tersebut disajikan pada halaman berikutnya.

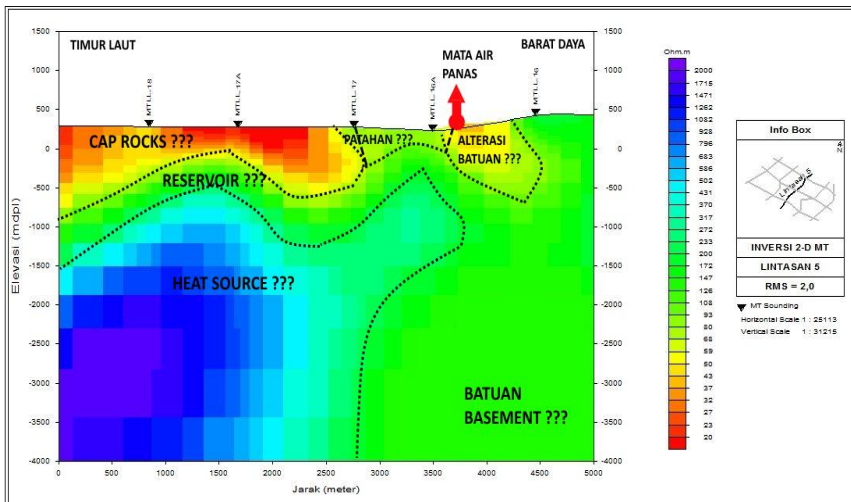


Gambar 5. 19 Interpretasi MT lintasan 4

Hasil pemodelan inversi MT 2-D pada lintasan empat terlihat sebaran resistivitas rendah yang dekat dengan permukaan bumi. Lapisan ini memiliki rentang nilai sebesar 20 – 50 ohm meter dan diperkirakan sebagai lapisan *cap rock*. Lapisan ini tersebar rata dari arah barat daya menuju timur laut dan menebal ke arah timur laut. Ketebalan lapisan ini bervariasi dari 100 sampai dengan 500 meter. Dibawah lapisan *cap rock* terdapat lapisan reservoir yang diperkirakan dari rentang nilai resistivitas sebesar 100 – 250 ohm meter. Ketebalan lapisan ini diperkirakan sekitar 500 meter dengan kedalaman yang

bervariasi. Dari arah timur laut, lapisan tersebut ditekan kebawah oleh lapisan penudung yang sangat tebal sehingga lapisan reservoir melengkung kearah bawah. Selanjutnya lapisan yang bernilai resistivitas lebih dari 250 ohm meter diperkirakan sebagai *heat source*. Tetapi lapisan *heat source* terdapat *gap* lapisan ditengah yang membuat distribusi resistivitasnya turun mendekati nilai lapisan reservoir. Hal ini diperkirakan sebagai respon batuan *basement* yang tidak terkena instruksi *heat source*. Lapisan *basement* memiliki nilai resistivitas yang mendekati nilai reservoir sehingga kemungkinan besar diperkirakan sebagai kelanjutan dari reservoir tersebut.

Lintasan kelima terdapat manifestasi panas bumi berupa mata air panas dan disekitar daerah tersebut terdapat sinter silika hasil dari endapan fluida hidrotermal. Berdasarkan hasil pemodelan MT secara 2-D terdapat indikasi alterasi batuan yang disekitar mata air panas seperti pada gambar 5.20.



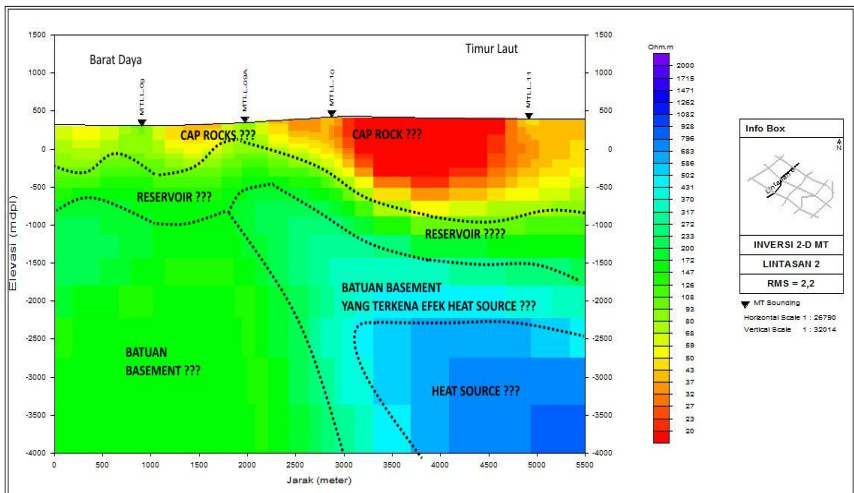
Gambar 5. 20 Interpretasi MT lintasan 5

Disekitar mata air panas terdapat nilai resistivitas yang relative rendah dengan rentang nilai 50 – 80 ohm meter. Sebaran nilai tersebut disekitar mata air panas diantara titik ukur MTLL 16A dan 16. Nilai resistivitas tersebut diperkirakan sebagai respon dari alterasi batuan yang disebabkan oleh fluida yang muncul di mata air panas. Kemudian distribusi resistivitas rendah dengan rentang nilai 20 – 50 ohm tersebar hampir merata dari arah timur laut menuju barat daya dan menebal mencapai ketebalan 1000 meter kearah timur laut. Nilai tersebut diperkirakan sebagai lapisan *cap rock* tapi tidak menerus sampai mata air panas disebabkan terdapat kontras resistivitas. Kontras tersebut diduga

sebagai patahan yang disebabkan oleh aktivitas sesar geser. Akibat patahan tersebut menimbulkan zona lemah yang mengakibatkan fluida didalam reservoir dapat muncul dipermukaan. Fluida yang mengalir disekitar patahan mengakibatkan proses alterasi batuan yang terjadi disekitar mata air panas tersebut.

Selanjutnya terdapat sebaran nilai resistivitas tinggi yang lebih dari 250 ohm meter yang menebal kearah timur laut namun kearah barat daya tidak terlihat persebaran nya. Hal tersebut diperkirakan sebagai lapisan *heat source* yang menyebabkan konveksi fluida didalam reservoir sehingga muncul dipermukaan sebagai mata air panas. Adapun reservoir tersebut terletak diantara lapisan *cap rock* dan *heat source* yang didapatkan dari identifikasi nilai resistivitas dengan rentang nilai 100 – 250 ohm meter. Lapisan tersebut ditekan dari atas oleh lapisan *cap rock* yang mengakibatkan melengkung kearah bawah. Sumber fluida hidrotermal pada hasil inversi ini belum ditemukan zona resapan sehingga belum dapat ditentukan aliran fluida hidrotermal pada lapisan reservoir.

Lintasan 6 menghasilkan pemodelan inversi MT 2-D seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. 21 Interpretasi MT lintasan 6

Terdapat sebaran nilai resistivitas rendah didekat permukaan bumi dengan rentang nilai 20 – 50 ohm meter yang diperkirakan sebagai respon dari struktur lapisan *cap rock*. Lapisan ini menebal kearah timur laut dengan ketebalan maksimal mencapai 2000 meter sedangkan arah barat daya ketebalan

lapisan tersebut bervariasi antar 100 – 500 meter. Dibawah lapisan penutup terdapat sebaran resistivitas dengan nilai menengah antara 100-250 ohm meter yang diperkirakan sebagai lapisan reservoir. Kemudian dibawah lapisan reservoir terdapat lapisan *heat source* yang didapatkan dari pendugaan nilai resistivitas yang mencapai lebih dari 250 ohm meter. Lapisan *heat source* terletak dibawah 1500 meter dari permukaan bumi dan sebaran lapisan tersebut menebal kearah timur laut dengan ketebalan maksimal mencapai lebih dari 2000 meter. Kearah barat daya terdapat struktur resistivitas yang sangat masif dengan rentang nilai 100-250 ohm. Struktur tersebut diperkirakan sebagai respon batuan basement yang tidak mengalami proses intrusi magma dari bawah.

Secara keseluruhan model inversi lintasan empat, lima, dan enam terdapat kemiripan pada sebaran nilai resistivitasnya. Pertama pada sebaran lapisan *heat source* dominan mengarah timur laut dan menebal hingga lebih dari 4000 meter dengan kenaikan nilai resistivitas mencapai lebih dari 2000 ohm meter. Hal ini diduga sebagai produk dari intrusi magma yang menembus lapisan batuan induk dan terakumulasi sebagai *heat source* yang memanaskan lapisan reservoir diatasnya. Batuan induk diinterpretasikan sebagai formasi vulkanik walimbong. Berikutnya terdapat lapisan yang memiliki distribusi resistivitas menengah dengan rentang 100-250 ohm yang diprediksi sebagai lapisan reservoir. Adapun berdasarkan sayatan geologi lapisan ini diduga sebagai lapisan andesit porifiri. Namun arah aliran fluida hidrotermal belum dapat diprediksi disebabkan tidak ada data pengukuran aliran fluida hidrotermal. Terakhir terdapat sebaran nilai resistivitas yang rendah dengan rentang nilai dibawah 50 ohm meter dan menebal kearah timur laut. Lapisan ini diindikasikan sebagai lapisan *cap rock* hasil produk pelapukan batuan vulkanik tak terpisahkan.

BAB 6 KESIMPULAN

Penelitian yang telah dilakukan menghasilkan simpulan dan saran penelitian sebagai berikut.

6.1 Simpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari analisa hasil pemodelan magnetotelurik 2-D adalah secara keseluruhan hasil inversi 2-D MT yang menggunakan metode *inversi non linear conjugate gradient* menghasilkan model inversi yang memiliki nilai RMS dibawah 2,5 %. Berdasarkan nilai tersebut seluruh hasil inversi MT dapat diinterpretasikan secara kuantitatif dan kualitatif. Secara kualitatif rentang nilai resistivitas hasil inversi MT digolongkan menjadi tiga jenis yaitu resistivitas rendah, sedang, dan tinggi. Nilai resistivitas rendah merupakan anomali medium konduktif, nilai sedang sebagai respon medium semi-konduktif, dan resistivitas tinggi sebagai indikasi medium resistif.

Sedangkan secara kuantitatif hasil inversi MT memiliki rentang nilai resistivitas yang dari 20 ohm meter hingga 2000 ohm meter dengan klasifikasi rentang nilai 20 – 50 ohm meter sebagai indikasi lapisan *cap rock*, 100 – 250 ohm meter sebagai lapisan reservoir, lebih dari 250 ohm meter sebagai lapisan *heat source*. Lapisan *cap rock* menebal kearah barat laut dan menipis kearah tenggara. Ketebalan lapisan ini bervariasi dari 100 meter hingga 1500 meter kedalaman bumi. Lapisan reservoir memiliki ketebalan sebesar 500 meter dari arah barat laut dan tenggara. Lapisan *heat source* memiliki ketebalan yang bervariasi mulai dari 1000 meter hingga lebih dari 2000 meter.

6.2 Saran

1. Pembuatan *forward model* disarankan menggunakan informasi penelitian terdahulu yang pernah dilakukan pada daerah yang sama. Informasi tersebut berupa hasil inversi yang beda metode pengukuran seperti hasil inversi 2-D gravity. Bila tidak ada maka menggunakan konsep bumi homogen *half-space* yang menganggap lapisan forward model memiliki resistivitas semu homogen terhadap kedalaman.
2. Parametrisasi inversi harus mempertimbangkan kualitas data terlebih dahulu untuk menentukan besaran nilai parameter pembobotan data outlier pada data observasi demikian juga pada data MT. Parameter yang dipertimbangkan adalah besaran nilai tau, lagrange, dan laplacian agar diperoleh model inversi yang optimum.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Budiraharjo, S., Utama, W., Warnana, D.D., Darmawan, A., 2017. Analisis Inversi 2D Metode Occam Untuk Memodelkan Resistivitas Bawah Permukaan Data Magnetotellurik. *Jurnal Geosaintek* 3, 1–12. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v3i1.2950>
- Chave, A.D., Jones, A.G., 2012. *The magnetotelluric method: Theory and practice*. Cambridge University Press.
- Dickson, M.H., Fanelli, M., 2004. *What is geothermal energy*. Istituto di Geoscienze e Georisorse-CNR, Pisa, Italy.
- Fiona, S., Karsten, B., 2005. *Practical Magnetotellurics*. NewYork: CambridgeUniversityPress.
- Grandis, H., 2013. *Metoda Magnetotellurik (MT)*. Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Jupp, D.L., Vozoff, K., 1977. Two-dimensional magnetotelluric inversion. *Geophysical Journal International* 50, 333–352.
- Kholid, M., Widodo, S., Sumber, K.P.B.P.-P., Geologi, D., 2011. *Survei Magnetotelurik Dan Gaya Berat Daerah Panas Bumi Lilli-Matangnga Kabupaten Polewali Mandar, Provinsi Sulawesi Barat*.
- Palacky, G.J., 1987. Clay mapping using electromagnetic methods. *First Break* 5, 295–306. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.1987015>
- Rahadinata, T., Takodama, I., 2015. *Survei Terpadu Gaya Berat dan Audio Magnetotelurik (AMT) Daerah Panas Bumi Pantar, Kabupaten Alor, Provinsi Nusa Tenggara Timur*. Prosiding Hasil Kegiatan Lapangan Pusat Sumber Daya Geologi Tahun Anggaran.
- Rodi, W., Mackie, R.L., 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics* 66, 174–187.
- Saptadji, N.M., 2009. *Karakterisasi Reservoir Panas Bumi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Simpson, Fiona, Bahr, K., 2005. *Practical magnetotellurics*. Cambridge University Press.
- Simpson, F., Bahr, K., 2005. Static shift, the long and the short of it: ‘correcting’ or modelling? *Practical magnetotellurics* 111–115.
- Unsworth, M., 2007. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Profil Penulis



Alif Al Bashri lahir di Pati, 13 September 1996 dari pasangan Bapak Nugroho dan Ibu Wiwik. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Pendidikan formal penulis dimulai dari SD N Geritan (2002-2008), kemudian melanjutkan sekolah di SMP N 1 Pati (2008-2011), lalu bersekolah di SMA N 1 Pati (2011-2014), dan sekarang penulis masih menempuh pendidikan sarjana di Departemen Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis ikut dan berkontribusi dalam kegiatan akademik dan non akademik. Bidang akademik meliputi menjadi asisten praktikum Eksplorasi Magnetik periode (2017) dan asisten praktikum Eksplorasi Elektromagnetik yang terdiri dari metode MT, VLF, dan GPR periode (2018). Selain itu penulis telah memiliki pengalaman kerja praktek tentang pengukuran dan pengolahan data Magnetotelurik di instansi Pusat Sumber Daya Mineral Batu Bara dan Panas Bumi (PSDMBP), ESDM, Bandung. Selanjutnya dibidang organisasi penulis pernah berkontribusi dalam kegiatan organisasi meliputi menjadi staff Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (2015-2017) dan menjadi staff Lembaga Dakwah Mahasiswa Teknik Geofisika (2015-2017). Adapun prestasi penulis yaitu pernah membuat prototipe Early Warning Gempa Bumi yang menggunakan bahasa pemrograman C++ dan komponen arduino. Prototipe tersebut digunakan sebagai produk final project dari mata kuliah Instrumentasi. Demikian sekilas tentang penulis, apabila ingin diskusi tentang metode magnetotelurik, pemrograman, dan sistem panas bumi dapat menghubungi email : alif.al.bashri@gmail.com.